

Reducción de mermas en paneles de aislamiento térmico mediante *Six Sigma* y un sistema de monitoreo en tiempo real

Fabio Maidana¹, Rodrigo Azcurra¹, Dra. Andrea Insfran-Rivarola², MSc. Ana Arévalos², Dr. Diego H. Stalder²

¹Alumno, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay

²Orientador, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay

Palabras clave:

- *Six Sigma*
- *DMAIC*
- *Gage R&R*
- Paneles PIR
- *LiDAR*
- Sistema de Monitoreo Mecatrónico
- Control de Procesos
- Servomecanismo
- Interfaz hombre-máquina
- *Raspberry Pi*

Resumen

Este trabajo aborda la reducción de mermas en la fabricación de paneles sándwich de PIR, originada por una alta variabilidad en el proceso de espumado. Mediante la metodología *Six Sigma* (*DMAIC*), se ejecutó un diagnóstico estadístico que identificó las causas raíz del problema, destacando la ineficiencia del sistema de medición manual y el impacto de variables críticas del proceso. Como solución, se diseñó, construyó y validó un prototipo mecatrónico para el monitoreo automatizado y en tiempo real de la expansión de la espuma. El sistema, que integra tecnología *LiDAR* y es controlado por una *Raspberry Pi*, demostró en pruebas su capacidad para realizar mediciones estables y precisas. El proyecto concluye estableciendo una base técnica robusta para el control y la optimización futura del proceso productivo.

Keywords:

- Six Sigma
- DMAIC
- Gage R&R
- PIR Panels
- LiDAR
- Mechatronic Monitoring System
- Process Control
- Servomechanism
- Human-Machine Interface
- Raspberry Pi

Abstract

This work addresses the reduction of scrap in the manufacturing of PIR sandwich panels, which originated from high variability in the foaming process. Using the Six Sigma (*DMAIC*) methodology, a statistical diagnosis was performed, identifying the root causes of the problem, highlighting the inefficiency of the manual measurement system and the impact of critical process variables.

As a solution, a mechatronic prototype was designed, built, and validated for the automated, real-time monitoring of foam expansion. The system, which integrates *LiDAR* technology and is controlled by a *Raspberry Pi*, demonstrated its capability to perform stable and precise measurements during testing. The project concludes by establishing a robust technical foundation for the future control and optimization of the production process.

1. Introducción

La competitividad en la industria manufacturera moderna, y en particular en la producción de paneles sándwich con núcleo de poliisocianurato (PIR), exige un control riguroso de la calidad y una alta eficiencia de procesos. Se determina que una de las principales fuentes de merma productiva se relaciona con la falta de sincronización entre dos tiempos críticos del espumado: el “tiempo de hilo” y el “tiempo de toque”. Esta descoordinación, que repercute directamente en la calidad del producto final, eleva los niveles de desperdicio y afecta la sostenibilidad de la operación.

Para abordar esta problemática, el trabajo se estructura bajo la metodología *Six Sigma*, aplicando el ciclo Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar (*DMAIC*), ampliamente reconocido por su eficacia en

la reducción de defectos, la disminución de la variabilidad y la optimización de procesos industriales [1]. El diagnóstico del proceso evidencia una fuerte dependencia de la medición visual y subjetiva del “tiempo de toque”, una práctica que, por su naturaleza, introduce una variabilidad significativa e inaceptable en el control del proceso. La investigación se justifica, por tanto, en la necesidad de transitar hacia un enfoque basado en datos objetivos, tal como lo prescribe la metodología científica.

A fin de superar esta limitación, se integra un enfoque multidisciplinario que combina la ingeniería industrial y la mecatrónica para el diseño de un sistema automatizado de medición basado en tecnología *Light Detection and Ranging (LiDAR)*. El prototipo resultante ofrece mediciones objetivas y en tiempo real sobre la expansión de la espuma, eliminando la in-

certidumbre asociada a la intervención humana. De este modo, la investigación se orienta a ofrecer una solución técnica para la reducción de mermas y, simultáneamente, a sentar un precedente en la integración de metodologías estadísticas con tecnologías de automatización para la mejora continua y el fortalecimiento de la competitividad industrial.

2. Objetivo General

Reducir las mermas en la fabricación de paneles de aislamiento térmico mediante la integración de la metodología *Six Sigma* y un sistema automatizado de monitoreo en tiempo real basado en tecnología *LiDAR*.

3. Objetivos Específicos

- Identificar las causas principales de las mermas en el proceso productivo.
- Implementar mejoras en las etapas críticas del proceso de producción utilizando herramientas de *Six Sigma*.
- Establecer mecanismos de control para mantener las mejoras alcanzadas, asegurando la sostenibilidad de los resultados a largo plazo.
- Diseñar un sistema de medición automatizado para el proceso de espumado.
- Programar un dispositivo de control para la gestión de datos de producción.
- Desarrollar una interfaz gráfica para el monitoreo del proceso productivo.

4. Marco Teórico

4.1. Casos de éxito de implementación de *Six Sigma*

La aplicación de metodologías de mejora continua como *Six Sigma*, *Lean Six Sigma* (*LSS*) y *Green Lean Six Sigma* (*GLSS*) ha demostrado ser una estrategia eficaz para la optimización de procesos en diversos contextos industriales. La literatura técnica reporta casos de éxito consistentes en la reducción de desperdicios, la mejora de la calidad y el incremento de la eficiencia operativa, validando el ciclo *DMAIC* como una herramienta robusta para el diagnóstico y la solución de problemas complejos.

Múltiples estudios de caso ilustran estos beneficios. En la manufactura de neumáticos, Sasikumar et al. [2] lograron reducir la tasa de defectos a la mitad, del 6 % al 3 %, mediante la implementación de *LSS* y herramientas como el *Total Productive Maintenance* (*TPM*). De manera similar, en un sector artesanal, Quiroz-Flores et al. [3] aplicaron *LSS* para disminuir la merma en una ladrillera del 14,23 % al 7,31 %, empleando técnicas como *Poka Yoke* y estandarización de procesos. En la industria alimentaria, Ortiz Porras

et al. [4] utilizaron *GLSS* para reducir el desperdicio de fruta en 2,23 %, mejorando simultáneamente la productividad y la huella de carbono.

La efectividad de la metodología es particularmente notable en la reducción de *scrap*. Enache et al. [5], al aplicar *DMAIC* en el proceso de doblado de carcasas metálicas, consiguieron una reducción del *scrap* del 90 %. Asimismo, Antonio Benito et al. [6] abordaron la inyección de plásticos para el sector automotriz, logrando disminuir el *scrap* del 17,2 % al 2,5 % y reducir el tiempo de ciclo en un 40 %. Estos resultados confirman el alto impacto de *Six Sigma* en la optimización de recursos y la mejora de la competitividad.

4.2. Casos de éxito de monitoreo automático en control de calidad

El monitoreo automático, mediante la integración de visión artificial, sensores ópticos y análisis de datos, se ha consolidado como una estrategia clave para incrementar la confiabilidad y reducir la variabilidad en procesos industriales. La evidencia muestra que la implementación de estas tecnologías permite mitigar errores humanos, optimizar el uso de recursos y reforzar la mejora continua. Los sistemas automatizados no solo mejoran la detección de defectos, sino que también posibilitan la corrección en tiempo real, transformando la inspección de una actividad pasiva a un control de proceso activo y dinámico.

Diversos casos de estudio validan la efectividad de estos sistemas. García Ortega [7] desarrolló un sistema de visión robotizado que eliminó los rechazos de cliente por remaches defectuosos, alcanzando una efectividad cercana al 99 %. Por su parte, Castaño et al. [8] implementaron una supervisión inteligente con un sensor láser 3D en la fabricación de paneles de poliisocianurato, logrando la corrección de la trayectoria de corte en tiempo real y reduciendo significativamente los tiempos de ciclo. Adicionalmente, Adrita et al. [9] propusieron una metodología híbrida que integra los principios de *LSS* y *Cross-Industry Standard Process for Data Mining* (*CRISP-DM*) para automatizar ajustes en la manufactura de implantes, eliminando la necesidad de inspección inicial y aumentando la producción diaria.

El alcance de estas tecnologías se extiende a la inspección de infraestructuras críticas. Saragih et al. [10] diseñaron un sistema de visión estéreo con una red neuronal *You Look Only Once* (*YOLO*) para la detección y cuantificación de defectos en el interior de tuberías, superando las limitaciones de los métodos tradicionales. Finalmente, la revisión de Ma et al. [11] sobre tecnologías de inspección en línea subraya una tendencia hacia la fusión de datos de múltiples sensores y la miniaturización, anticipando sistemas robóticos cada vez más avanzados y autónomos. Estos ejemplos demuestran una clara evolución hacia la ins-

pección inteligente como pilar de la industria 4.0.

4.3. Contexto del proceso industrial

El estudio se centra en la fabricación continua de paneles sándwich con núcleo de PIR, donde una espuma termoestable se lamina entre dos chapas metálicas. La calidad del panel depende de la sincronización de tiempos críticos en la reacción química, tales como el tiempo de crema (inicio visible de la reacción), tiempo de hilo (momento en que la espuma presenta una textura filamentososa), tiempo de toque (instante en que la espuma contacta la chapa superior) y tiempo de fin de levantamiento (cuando la espuma alcanza su altura máxima). Actualmente, la medición manual y subjetiva de estos parámetros genera una alta variabilidad en el proceso, lo que conduce a una proporción considerable de productos defectuosos. Para solucionar esta problemática, se propone implementar un sistema de medición automatizado basado en tecnología *LiDAR*. Este sistema permite capturar de manera objetiva y en tiempo real la expansión de la espuma, con el fin de obtener datos precisos que faciliten una gestión de proceso más efectiva, reduzcan las mermas y mejoren la calidad del producto final.

4.4. ¿Por qué *Six Sigma*?

En un entorno industrial competitivo, la producción de bienes con mínima variabilidad es un factor estratégico para la sostenibilidad empresarial [12]. En este contexto, la metodología *Six Sigma* emerge como un enfoque sistemático para la mejora de procesos, que combina herramientas estadísticas avanzadas con principios de gestión para reducir la variabilidad y eliminar defectos [1]. Su aplicación, a través del ciclo *DMAIC*, permite traducir datos en decisiones estratégicas, identificar causas raíz e implementar soluciones sostenibles. La eficacia de *Six Sigma* está demostrada en la literatura, con mejoras reportadas en indicadores clave como el índice de capacidad del proceso y la reducción de mermas [13], asegurando además que la producción responda a las necesidades del cliente *Voice of Customer (VOC)* [14].

4.5. El ciclo *DMAIC*

La metodología *Six Sigma* se implementa a través del ciclo *DMAIC*, una secuencia de cinco fases que organiza la mejora de procesos a partir de datos estadísticos [1, 14].

La fase Definir establece los límites del proyecto, identifica al cliente y traduce sus expectativas en métricas técnicas a través de herramientas como el *Project Charter*, el diagrama *Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers (SIPOC)* y la definición de parámetros Críticos para la Calidad (*CTQ*) en función de la *VOC* [1, 15].

La fase Medir tiene como objetivo caracterizar el desempeño actual del proceso para establecer una línea base confiable; para ello, es fundamental validar el sistema de medición mediante estudios de repetibilidad y reproducibilidad (*Gage R&R*), garantizando así que la variación observada no sea atribuible a errores de medición [16, 17].

En la fase Analizar, se identifican las causas raíz del problema y se confirman con datos, transformando la descripción del desempeño en conocimiento estadístico. Se utilizan herramientas como el diagrama de causa-efecto y la estratificación de datos para establecer relaciones de causa y efecto sobre las variables críticas para la calidad [15, 16].

Finalmente, la fase Controlar diseña un sistema para mantener las mejoras logradas y evitar la reaparición de problemas, lo que se consigue a través de la estandarización de métodos, la documentación y el monitoreo mediante herramientas de Control Estadístico de Procesos (*SPC*) [12, 16].

4.6. Fundamentos de sistemas mecatrónicos

La mecatrónica se define como la integración sinérgica de mecánica, electrónica, informática y control para el desarrollo de productos y procesos industriales [18, 19]. Todo sistema mecatrónico se estructura a partir de cuatro elementos esenciales: sensores, que capturan variables físicas; actuadores, que ejecutan acciones mecánicas; un controlador, que procesa la información; y los componentes mecánicos que constituyen la base física del sistema. El flujo operativo sigue la cadena sensor-procesador-actuador, complementada con retroalimentación para asegurar un control preciso [18, 20].

4.7. Física del tiempo de vuelo

La medición de distancia mediante sensores de Tiempo de Vuelo (*ToF*) se basa en emitir un pulso de luz y determinar el tiempo que tarda en regresar al detector. La distancia se calcula dividiendo este tiempo por dos y multiplicándolo por la velocidad de la luz [21, 22]. Existen variantes como el Tiempo de Vuelo Directo (*dToF*), que mide el intervalo de tiempo directamente, y el Tiempo de Vuelo Indirecto (*iToF*), que calcula el desfase de una onda modulada [23]. La precisión del sistema depende de la capacidad para discriminar intervalos temporales muy breves, del orden de nanosegundos a picosegundos, pero es susceptible a errores por la reflectancia del material, el ángulo de incidencia y las condiciones ambientales adversas [22, 24, 25].

4.8. Actuación y control de servomecanismos

Los servomecanismos son actuadores eléctricos compuestos por un motor de corriente directa, un tren

de engranajes y un circuito de control, utilizados ampliamente en robótica y mecatrónica. Su posición angular se controla mediante señales de modulación por ancho de pulso (*PWM*), donde la duración del pulso determina el ángulo del eje [26, 27]. La precisión del sistema depende de la resolución angular efectiva y de factores como el tiempo muerto (*deadband*) y la histéresis. Para mejorar la estabilidad y repetibilidad, se recomienda el uso de temporizadores de *hardware* dedicados para la generación de la señal *PWM*, lo que los convierte en una solución económica y fiable para movimientos de barrido en sistemas de inspección y automatización [26, 28].

4.9. Principios para la interfaz humano-máquina

Una Interfaz Humano-Máquina (*HMI*) es un componente esencial en la automatización industrial que permite a los operarios monitorear y controlar procesos de manera eficiente. Un diseño de *HMI* eficaz, centrado en el usuario, se rige por principios de ergonomía y usabilidad, como la claridad visual, la organización jerárquica de la información y la provisión de una conciencia situacional clara. La interacción debe ser intuitiva, con retroalimentación inmediata y mecanismos para prevenir errores, asegurando así la reducción de tiempos de inactividad, la mejora de la calidad y el refuerzo de la seguridad operativa [29].

5. Metodología

El proyecto se estructuró siguiendo la metodología *Six Sigma* y su ciclo *DMAIC*.

En la fase Definir, se delimitó el problema de la alta variabilidad en los tiempos de espumado y su impacto en la merma. Se elaboró un *Project Charter* y se mapeó el proceso con la herramienta *SIPOC* para identificar los puntos críticos y traducir las necesidades internas de calidad en parámetros medibles.

Durante la fase Medir, se cuantificó el desempeño inicial del proceso para establecer una línea base, utilizando datos de producción de enero a septiembre de 2024. Se realizaron estudios de repetibilidad y reproducibilidad (*Gage R&R*) tanto al método de medición manual como al sistema *LiDAR* propuesto, lo que confirmó que la variabilidad se concentraba en la sincronización del espumado y justificó la necesidad de un sistema automatizado.

En la fase Analizar, se identificaron las causas raíz de la variabilidad mediante una combinación de herramientas cualitativas y cuantitativas. Se utilizó un diagrama de *Ishikawa* y un *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)* para organizar y priorizar hipótesis, las cuales fueron validadas estadísticamente a través de análisis de correlación y un modelo de regresión lineal múltiple escalonada (*stepwise*).

Durante la fase Mejorar, la solución se centró en el diseño, construcción e implementación de un sis-

tema de monitoreo mecatrónico a medida. Este prototipo, compuesto por un sensor *LiDAR*, un servomecanismo y una *HMI*, fue validado mediante un experimento comparativo para cuantificar su superioridad en precisión y reducción de variabilidad frente al método manual.

Finalmente, en la fase Controlar, se implementó un Plan de Control para sostener las mejoras. Se utilizaron herramientas de Control Estadístico de Procesos (*SPC*), como una gráfica I-MR para el porcentaje de merma y un diagrama de Pareto para el producto no conforme. Además, se estandarizó el registro de datos a través de la *HMI* del sistema *LiDAR* y se establecieron capacitaciones y auditorías periódicas.

6. Resultados

6.1. Definir

En la fase Definir, el problema se cuantificó y estructuró formalmente. Se identificó que la causa principal de la merma en la producción de paneles PIR era la alta variabilidad en la sincronización de los tiempos críticos del espumado (“tiempo de hilo” y “tiempo de toque”). Estos parámetros se medían con métodos empíricos y subjetivos, como la observación de filamentos en un vaso como en la Figura 1



Figura 1: Determinación empírica del tiempo de hilo mediante observación de la formación de filamentos en una muestra de espuma PIR.

y el uso de una tira de papel sobre la espuma como en la Figura 2, lo que generaba una falta de repetibilidad y conducía a defectos como falta de llenado y deformaciones como se muestra en la Figura 3. El impacto económico de esta situación se determinó en USD 34.500 en costos de merma acumulados entre enero y septiembre de 2024, con una tasa promedio del 9%.

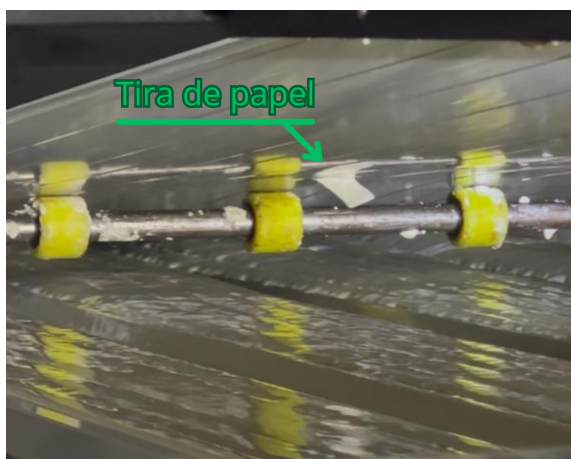


Figura 2: Determinación empírica del tiempo de toque mediante cronómetro de una tira de papel sobre la espuma PIR.



Figura 3: Visualización típica de defectos por espumado incorrecto.

A partir de este diagnóstico, se estableció el objetivo general de reducir la tasa de merma a un 4 % en un plazo de seis meses. La Voz del Cliente (VOC), recopilada del personal de producción, se tradujo en Características Críticas para la Calidad (CTQ) medibles, entre las que destaca alcanzar un índice de capacidad de proceso (C_{pk}) superior a 1,33 para el desfase temporal (ΔT). Todo el marco del proyecto, incluyendo antecedentes, objetivos, alcance, limitaciones y entregables, se consolidó en dos documentos clave de la metodología *Six Sigma*: el Acta del Proyecto (*Project Charter*) y el diagrama SIPOC, que mapeó el estado actual del proceso (*As-Is*).

6.2. Medir

En la fase Medir se estableció la línea base del proceso utilizando los datos de producción de enero a septiembre de 2024. Se determinó una tasa de merma promedio por orden del 9,53 %, lo que representó

un costo económico de USD 34.504 en dicho periodo. El análisis de composición de la merma, mediante diagramas de Pareto y de caja, reveló que los paneles de tipo Machihembrado (MCH), especialmente los de mayor espesor (100 mm y 150 mm), eran los principales contribuyentes tanto al costo del desperdicio como a la variabilidad del proceso, para que no exista merma teóricamente se debe cumplir la relación de la Figura 4.

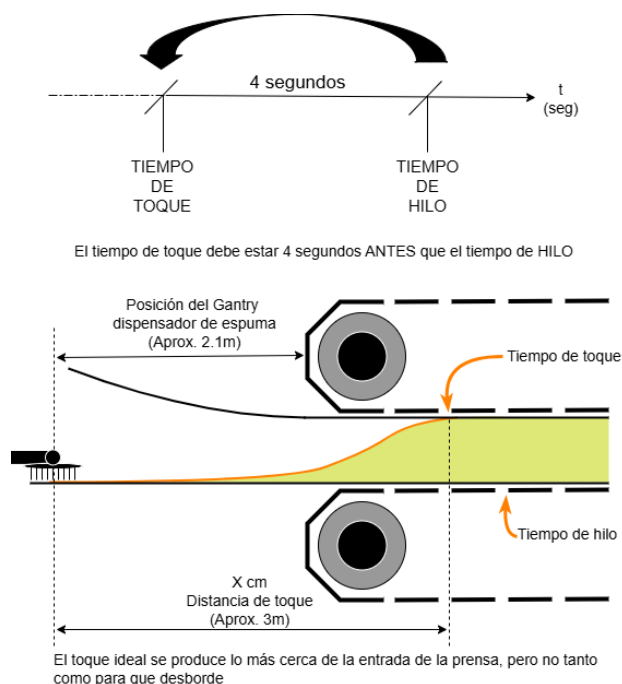


Figura 4: Visualización típica de defectos por espumado incorrecto.

El resultado central de esta fase fue la validación del sistema de medición manual a través de un estudio *Gage R&R*. El análisis demostró que, si bien la medición del “tiempo de hilo” era aceptable ($\%VarEstudio = 24,7 \%$) y la del “tiempo de toque” era marginalmente aceptable ($\%VarEstudio = 32,1 \%$), el sistema era inaceptable para medir la variable crítica del proyecto, el desfase ΔT . Para la tolerancia objetivo de ± 1 segundo, el sistema de medición consumía el 39,7 % de la tolerancia ($\%P/T$), superando el límite del 30 %. Se concluyó que el método manual era una fuente principal de ruido, siendo responsable del 66 % de la variación observada en ΔT .

Finalmente, el análisis de capacidad del proceso confirmó que el sistema era inestable. Se obtuvo un índice de capacidad a corto plazo (C_{pk}) de 1,04, pero el índice de desempeño a largo plazo (P_{pk}), que refleja la realidad operativa, fue de solo 0,57, muy por debajo del mínimo aceptable. Estos hallazgos proporcionaron la evidencia cuantitativa de que el sistema de medición manual era una causa raíz del problema y justificaron la necesidad de desarrollar una solución de medición, así como también se observó que

la merma también disminuía en caso de producciones más grandes (Figura 5).

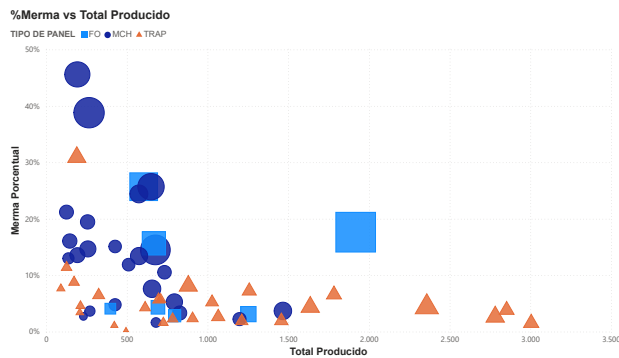


Figura 5: Relación merma porcentual vs m^2 producidos (tamaño del punto proporcional al costo de scrap).

6.3. Analizar

En la fase Analizar se procesaron los datos para identificar las causas raíz de la merma y de la variabilidad del desfase ΔT . El análisis comenzó con un enfoque cualitativo, construyendo un diagrama de Ishikawa (6M) junto a un equipo multifuncional para mapear todas las causas potenciales. Posteriormente, estas causas fueron priorizadas mediante un Análisis de Modo y FMEA, que asignó un Número de Prioridad de Riesgo (RPN) a cada una, permitiendo enfocar los esfuerzos en los factores de mayor impacto.

El análisis cuantitativo inició con un estudio de correlación de Pearson por familia de panel, el cual reveló que no existía una única causa dominante para todos los productos. Por ejemplo, en los paneles MCH gruesos, la merma mostró una fuerte correlación negativa con ΔT ($\rho = -0,91$), mientras que en los paneles FO, la temperatura ambiente fue el factor más influyente ($\rho = -0,81$). Un intento inicial de crear un modelo de regresión lineal múltiple con todas las variables fracasó debido a la presencia de multicolinealidad severa ($VIF > 1000$), lo que invalidó el modelo. Aunque un Análisis de Componentes Principales (ACP) ayudó a entender la estructura subyacente de los datos, se descartó como modelo final por su falta de interpretabilidad directa en términos operativos.

El resultado definitivo de esta fase se obtuvo mediante un modelo de regresión lineal múltiple escalonada (*stepwise*). Este modelo final demostró ser estadísticamente robusto, con un buen equilibrio entre ajuste ($R^2_{ajustado} = 78,7\%$) y capacidad predictiva ($R^2_{predicho} = 71,6\%$), y sin problemas de multicolinealidad ($VIF < 8$). El análisis confirmó como causas raíz estadísticamente significativas de la merma: la velocidad de línea, el porcentaje de catalizador, la temperatura ambiente, el tipo de panel (familia) y el desfase entre la distancia de toque real y teórica. Este modelo proporcionó la base cuantitativa para estimar el

impacto de las mejoras a implementar en la siguiente fase (Figura 6).

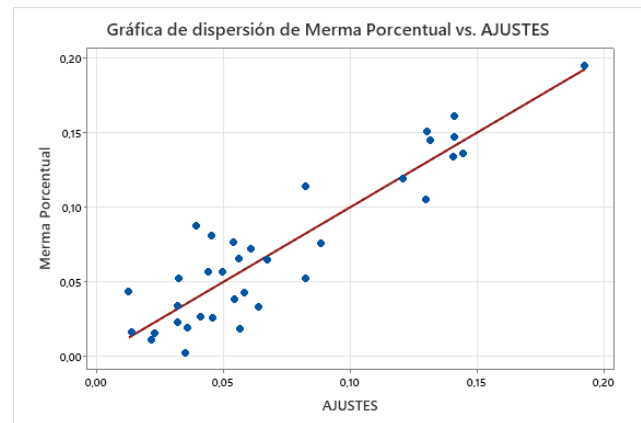


Figura 6: Gráfica Observado vs. Predicción.

6.4. Mejorar

La fase Mejorar se centró en la materialización de la solución tecnológica: un sistema de monitoreo mecatrónico diseñado para eliminar la subjetividad de la medición manual. El diseño conceptual se basó en una arquitectura modular con una unidad de cómputo central, un subsistema de sensado, uno de actuación y una HMI. Tras comparar tecnologías de medición sin contacto, se seleccionó la tecnología *LiDAR* por ofrecer el mejor equilibrio entre el rango operativo requerido, la precisión y la facilidad de integración. El flujo de procesamiento de la señal fue diseñado para que el sensor adquiriera la distancia, el controlador gobernara el barrido del servo, la HMI visualizara los datos en tiempo real y, finalmente, la información se almacenara de forma estructurada para su posterior análisis. El esquema del dispositivo implementado puede observarse en la Figura 7.

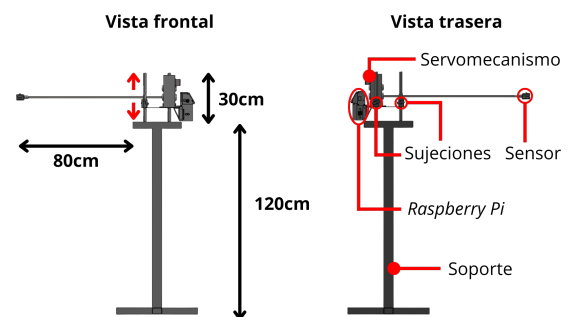


Figura 7: Esquema del dispositivo.

El subsistema mecánico se construyó sobre una robusta estructura de acero para garantizar la estabilidad frente a las vibraciones de la planta, con un mecanismo de regulación vertical para ajustar la al-

tura del sensor. Componentes clave como la caja reductora de 20:1, los engranajes y las carcasas protectoras para la electrónica se fabricaron en *Poly lactide Acid (PLA)* mediante impresión 3D, optimizando costos y permitiendo un diseño a medida. Se diseñaron encapsulados específicos para proteger el sensor *LiDAR* del polvo y los residuos del proceso, y para la electrónica de control, asegurando ventilación para la disipación de calor.

Para el subsistema electrónico (Figura 8) se seleccionó una *Raspberry Pi Zero 2W* como unidad de control por su capacidad de cómputo, conectividad inalámbrica integrada y bajo costo. La medición de distancia se confió al sensor *LiDAR* SEN0366, mientras que la actuación angular se implementó con un servomecanismo de alto torque DS-S020B-C, gobernado por un controlador *PWM* dedicado (PCA9685) para asegurar una señal estable. La interacción con el operario se realiza a través de una pantalla táctil MPI3508 de 3,5 pulgadas, y la fiabilidad de la alimentación eléctrica se garantizó con un módulo *Uninterruptible Power Supply (UPS)*. La arquitectura de comunicación integró los buses *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)* para el *LiDAR*, *Inter-Integrated Circuit (I2C)* para el controlador del servo y el monitor del *UPS*, y *Serial Peripheral Interface (SPI)* para la pantalla táctil.

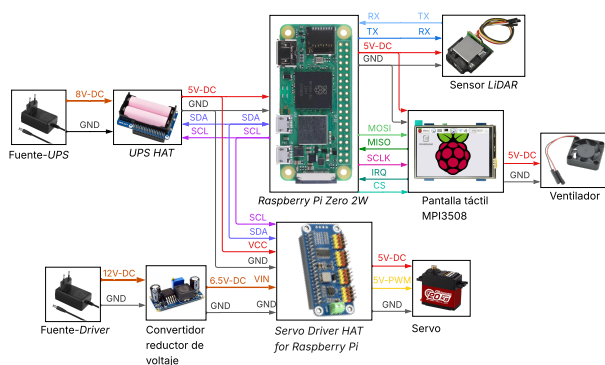


Figura 8: Conexiones del prototipo.

El software de control se desarrolló en *Python* con una arquitectura orientada a objetos, creando clases para abstraer la funcionalidad de cada componente de *hardware*. La lógica de control gestiona el flujo de operación a través de la *HMI*, desde la configuración inicial (*offset*, tipo de panel, temperatura) y la selección de modo (manual o automático), hasta la ejecución de los ciclos de medición y el registro de datos. El sistema almacena cada lectura en archivos *Comma-Separated Value (CSV)* junto con variables de contexto como fecha, hora, tipo de panel y estado del ciclo, asegurando la trazabilidad. Se implementó un acceso remoto mediante *X2Go*, lo que facilitó la depuración y el mantenimiento del software directamente en la línea. El flujo de operación de la interfaz

gráfica puede verse en la Figura 11.

La integración de todos los subsistemas dio como resultado un prototipo funcional montado sobre su soporte, con el sensor *LiDAR* y el servo en la parte superior, y la electrónica de control y la *HMI* en el plano frontal. El procedimiento de arranque fue automatizado: al energizar el sistema, se inicializa la *Raspberry Pi*, se posiciona el servo en su punto de referencia y se lanza la *HMI*, dejando el dispositivo listo para operar. El diseño del prototipo y su implementación final pueden verse en la Figura 9.

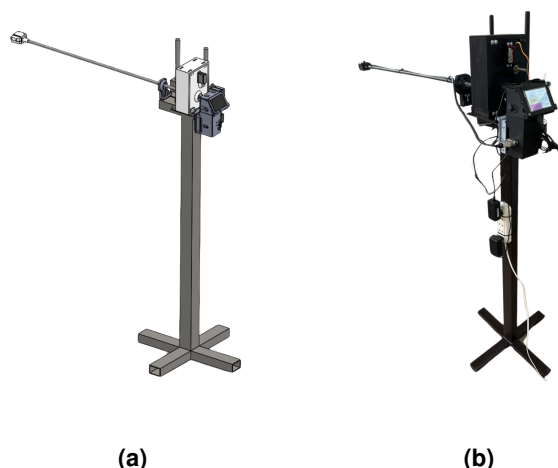


Figura 9: (a) Diseño conceptual de la estructura. (b) Estructura física implementada.

La validación del sensor *LiDAR* se realizó en un ensayo controlado, confirmando su estabilidad y precisión. Se determinó que la configuración óptima para el entorno de planta era una frecuencia de 10 Hz y una resolución de 0,1 mm, con la cual se obtuvo una desviación estándar de aproximadamente 1,9 mm, un valor muy inferior a la tolerancia de ± 130 mm del proceso. Se constató que frecuencias más altas, como 20 Hz, introducían un ruido considerable en la medición. Los resultados de las pruebas de validación del sensor de distancia pueden verse en la Figura 10

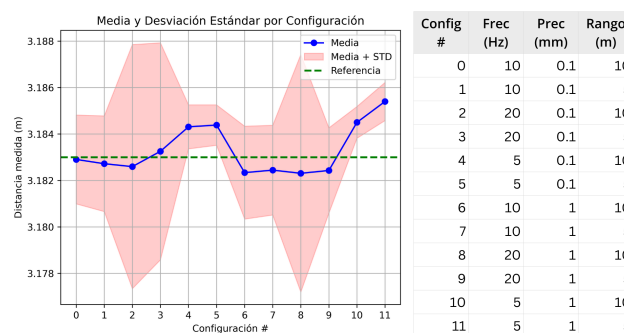


Figura 10: Resultados de la validación del *LiDAR*.

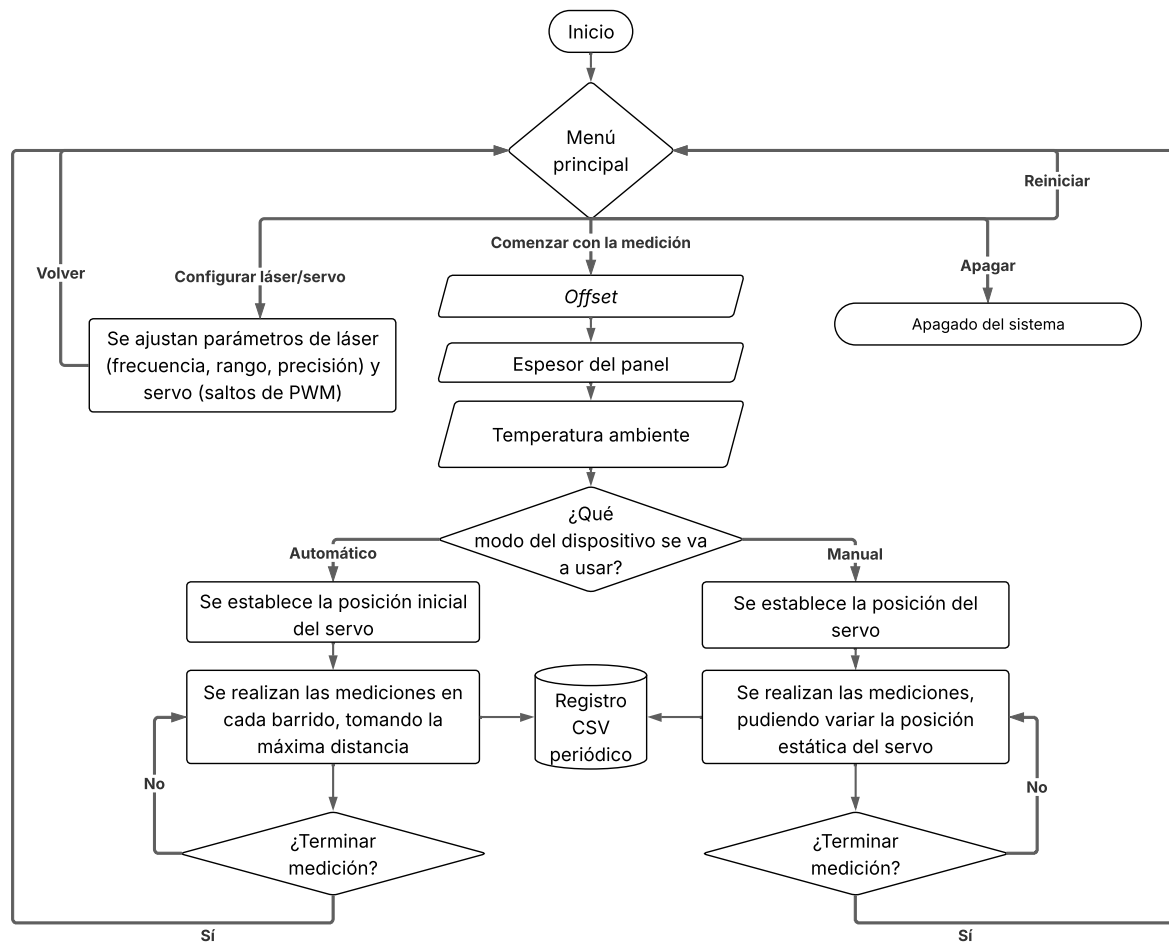


Figura 11: Flujo del HMI.

Finalmente, la validación del servomecanismo, acoplado a la caja reductora 20:1, demostró que el sistema alcanzaba una resolución angular efectiva de aproximadamente $0,22^\circ$ por cada incremento de 50 unidades de *PWM*. Se cuantificó una histéresis sistemática entre los barridos de ida y vuelta de unos $0,235^\circ$, un valor pequeño y consistente, considerado aceptable. Estos resultados confirmaron que tanto el sensor como el actuador cumplían con los requisitos de estabilidad, precisión y repetibilidad definidos en el diseño. Los resultados de las pruebas del servomecanismo pueden verse en la Figura 12

6.5. Controlar

En la fase Controlar, se establecieron los mecanismos para sostener las mejoras en el tiempo. Se diseñó e implementó un Plan de Control que detalla las variables críticas del proceso, los métodos y frecuencias de medición, los responsables y las acciones de reacción ante desviaciones. Un elemento clave de la estandarización fue la integración de los registros operativos con la HMI del prototipo *LiDAR*. La

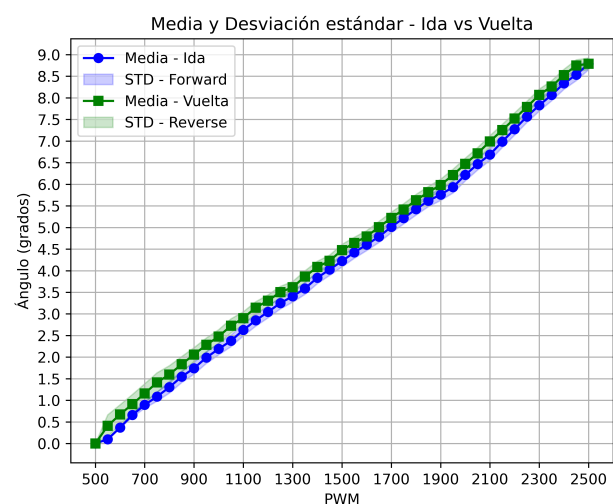


Figura 12: Resultados de la validación del servomecanismo.

interfaz se programó para exigir el ingreso obligatorio de parámetros de contexto (tipo de panel, espesor,

temperatura y *offset* del sensor) antes de habilitar una medición, bloqueando la operación ante datos faltantes o fuera de rango. Esta validación en el punto de uso reforzó la disciplina operativa y aseguró la calidad de los datos para el seguimiento estadístico.

Para el monitoreo continuo del proceso, se implementaron dos herramientas de SPC. Se utilizó una gráfica I-MR para vigilar el porcentaje de merma por orden de producción, permitiendo detectar en tiempo real la aparición de causas especiales de variación. Complementariamente, un diagrama de Pareto del producto no conforme por familia de panel se empleó para priorizar las acciones de mejora en las áreas de mayor impacto. El seguimiento estadístico durante esta fase evidenció un resultado preliminar positivo: el promedio de merma del primer semestre del año se redujo a un 6,07 %, mostrando un avance considerable hacia la meta del 4 %. No obstante, se establece como trabajo futuro la validación metrológica completa del sistema *LiDAR* en operación continua para consolidar los logros a largo plazo.

7. Conclusión

La investigación abordó la variabilidad y las mermas en paneles PIR mediante la metodología *Six Sigma*, transformando un problema inicialmente percibido en un diagnóstico estadístico sustentado. A partir de la línea base de Medir y herramientas como *SI-POC* y cartas I-MR, se evidenció inestabilidad y la presencia de causas especiales; en Analizar se identificó la medición manual del tiempo de toque como causa raíz crítica. En respuesta, se diseñó y validó un prototipo mecatrónico basado en *LiDAR*, que mostró mayor precisión y repetibilidad que el método previo, y se definió un Plan de Control y estandarización documental. El seguimiento de enero–mayo de 2025 registró una merma media de 6,07 % (frente a 9 %), un avance consistente hacia la meta del 4 % y evidencia de que la combinación de ajustes de receta, sincronía operativa y control estadístico mejora el desempeño. El trabajo deja una base metodológica y técnica clara: causas cuantificadas con soporte gráfico y multivariante, una solución tecnológica validada para medir de forma objetiva y en tiempo real, y mecanismos de control estandarizados; además, traza la hoja de ruta para su industrialización (robustez mecánica y eléctrica, integración con *PLC*, despliegue de cartas en línea y *POE* actualizados), consolidando la mejora sostenida del proceso y su capacidad para sostener reducciones adicionales de merma en el corto y largo plazo.

Referencias

- [1] T. Pyzdek and P. A. Keller, *The Six Sigma Handbook, 5E: A Complete Guide for Green Belts*,

Black Belts, and Managers at All Levels, 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2018.

- [2] A. Sasikumar, P. Acharya, M. Nair, and A. Ghafar, "Applying lean Six Sigma for waste reduction in a bias tyre manufacturing environment," *Cogent Business & Management*, vol. 10, no. 2, p. 2228551, 2023.
- [3] J. C. Quiroz-Flores, I. F. Varas-Díaz, and A. Ali, "Lean Six Sigma methodology to reduce excess wastage in a brickyard: a case study," *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 92–105, 2023.
- [4] J. E. Ortiz Porras, A. M. Bancovich Erquínigo, T. C. Candia Chávez, L. M. Huayanay Palma, R. K. Moore Torres, and O. R. Tinoco Gomez, "Green Lean Six Sigma model for waste reduction of raw material in a nectar manufacturing company of Lima, Peru," *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 16, no. 2, pp. 169–185, 2023.
- [5] I.-C. Enache, O. R. Chivu, A.-M. Rugescu, E. Ionita, and I. V. Radu, "Reducing the Scrap Rate on a Production Process Using Lean Six Sigma Methodology," *Processes*, vol. 11, no. 4, p. 1295, 2023.
- [6] G. Antonio Benito, B. Avila-Martinez, and E. Franco-Austria, "Implementación de DMAIC para la reducción de Scrap: Un caso de estudio," *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 12, no. Especial3, pp. 24–31, 2024.
- [7] C. E. García Ortega, "Desarrollo de un Código de Evaluación de un Sistema de Visión para Fallas de Falta y Formado de Remaches," Master's thesis, Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ), Aguascalientes, México, 2015. [Online]. Available: <https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/122/1/GarciaOrtegaCesarE%20MMANAV%202015.pdf>
- [8] F. Castaño Romero, A. Villalonga Jaén, and R. E. Haber Guerra, "Sistema inteligente de inspección y referenciado para operaciones de perfilado de paneles termoaislantes. Un caso real de aplicación," Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, Informe Técnico, 2019. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/64926/>
- [9] M. M. Adrita, A. Brem, D. O'Sullivan, E. Allen, and K. Bruton, "Methodology for Data-Informed Process Improvement to Enable Automated Manufacturing in Current Manual Processes," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, p. 3889, 2021.

- [10] A. S. Saragih, F. Aditya, and W. Ahmed, "Defect Identification and Measurement using Stereo Vision Camera for In-Line Inspection of Pipeline," in *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, Dubai, United Arab Emirates, 2022, pp. 1–5.
- [11] Q. Ma, W. Liang, and P. Zhou, "A Review on Pipeline In-Line Inspection Technologies," *Sensors*, vol. 25, no. 15, p. 4873, 2025.
- [12] D. C. Montgomery, *Introduction to statistical quality control*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019.
- [13] J. Antony, R. D. Snee, and R. W. Hoerl, "Lean Six Sigma: Yesterday, Today and Tomorrow," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 34, no. 7, pp. 1073–1093, 2017.
- [14] M. J. Harry and R. Schroeder, *Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*. New York, NY: Currency, 2000.
- [15] Six SIGMA Academy, *El impulsor de la memoria II Seis SIGMA: A pocket guide of tools for Six SIGMA improvement teams*. Methuen, MA: Goal/QPC, 2005.
- [16] H. Gutiérrez Pulido, *Calidad y productividad*, 5th ed. México, D.F.: McGraw-Hill Education, 2020.
- [17] Automotive Industry Action Group (AIAG), *Measurement Systems Analysis (MSA): Reference Manual*, 4th ed. Southfield, MI: Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010.
- [18] M. E. Soudagar, "Mechatronics: A Multidisciplinary Field of Engineering," *International Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering & Technology (IJARMET)*, vol. 1, no. 1, pp. 27–29, 2015.
- [19] M. K. Yalcin, "Introduction to Mechatronics," Course EEE436 Lecture Slides, Dept. of Control and Automation Eng., Istanbul Technical Univ., Istanbul, Turkey. [Online]. Available: <https://web.itu.edu.tr/yalcinme/files/courses/MMG/ch1%20introduction%20to%20mechatronics.pdf>
- [20] E. Lugo-González, A. Velarde-Galván, and M. Arias-Montiel, "Diseño mecatrónico implementado en el desarrollo de prototipos virtuales y físicos," in *Mujeres en la Ciencia Ingeniería*. Querétaro: ECORFAN-Mexico, 2020, pp. 22–39.
- [21] M. Chen, "1D-TOF: System modeling, processing algorithm design and implementation," Master's thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2022. [Online]. Available: <https://resolver.tudelft.nl/uuid:0d86b6ed-1a93-46df-8057-be02f17d0abf>
- [22] J. Kvam, "Time of Flight: Principles, Challenges, and Performance," ST Technology Tour 2017 Presentation., 2017. [Online]. Available: https://www.st.com/content/dam/technology-tour-2017/session-1_track-4_time-of-flight-technology.pdf
- [23] F. Piron, D. Morrison, M. R. Yuce, and J.-M. Redouté, "A Review of Single-Photon Avalanche Diode Time-of-Flight Imaging Sensor Arrays," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 11, pp. 12 654–12 666, 2021.
- [24] W. Li, T. Shi, R. Wang, J. Yang, Z. Ma, W. Zhang, H. Fu, and P. Guo, "Advances in LiDAR Hardware Technology: Focus on Elastic LiDAR for Solid Target Scanning," *Sensors*, vol. 24, no. 22, p. 7268, 2024.
- [25] J. Choe, H. Cho, and Y. Chung, "Performance Verification of Autonomous Driving LiDAR Sensors under Rainfall Conditions in Darkroom," *Sensors*, vol. 24, no. 1, p. 14, 2024.
- [26] M. Á. Castillo-Martínez, B. E. Carvajal-Gámez, and F. J. Gallegos Funes, "Efectos en la resolución de servomotores con interfaz PWM por la generación de señales en microcontroladores," *Research in Computing Science*, vol. 147, no. 7, pp. 89–98, 2018.
- [27] J. M. Sánchez Muñoz, "Evaluación experimental de servo motores para robótica aérea," Master's thesis, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2017. [Online]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91345/fichero/Memoria+TFG+Jos%C3%A9+Manuel+S%C3%A1nchez.pdf>
- [28] D. J. Tipantaxi Chiguano and C. A. Villacrés Puga, "Desarrollo y construcción de un sistema de bola balancín sobre una plataforma regulada mediante un control Fuzzy," Master's thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2017, trabajo de Titulación. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14029>
- [29] Rockwell Automation, "Process HMI Style Guide," Rockwell Automation, White Paper PROCES-WP023A, may 2019. [Online]. Available: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/proces-wp023_-en-p.pdf