Design of a PET Compaction System for Sustainable and Efficient Waste Management

Adolfo Santiago Valdivia López [1]; José Luis Serna Landivar[1]; Daniela Anticona Valderrama[2]; Edú Paredes Rojas[3]
[1]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, E14373@utp.edu.pe; C33126@utp.edu.pe
[2]Universidad Privada del Norte, Perú, daniela.anticona@*upn.pe*
[3]Universidad Científica del Sur, Perú, *eparedesr@cientifica.edu.pe*

Abstract– ***The efficient management of polyethylene terephthalate (PET) waste requires solutions that reduce its volume and improve storage, transportation, and material recovery. This study aimed to design and virtually validate an automated PET bottle compaction system intended for small recycling companies. The VDI 2221 systematic design methodology was applied to define requirements, develop the functional structure, and produce the detailed design, while the VDI 2225 guideline was used to assess alternatives through weighted technical and economic criteria. The selected solution integrated mechanical, hydraulic, electrical, and control subsystems, which were modeled and simulated using Autodesk Inventor, FluidSIM, and TIA Portal V16. The system was redesigned for a nominal capacity of 55 kg per batch and a target volume reduction ratio of 4:1. A preliminary design load of 75 kN was adopted and a double-acting hydraulic cylinder with an 80-mm bore and a 56-mm rod, driving a laterally guided platen, was selected (buckling safety factor of about 5.3). The required pressure was approximately 14.9 MPa; with a nominal circuit pressure of 16 MPa and a flow rate of 14 L/min, the 0.90 m effective compaction stroke was estimated at 19.4 s. Simulation results confirmed the coordination of manual loading, shredding, level detection, compaction, and cylinder return. The results support the functional feasibility of the redesigned system and provide a basis for future prototype construction and experimental validation.***

Keywords-- PET compaction; waste management; systematic design; industrial automation; simulation.

Diseño de un sistema de compactación de PET orientado a la sostenibilidad y eficiencia en la gestión de residuos

Adolfo Santiago Valdivia López [1]; José Luis Serna Landivar[1]; Daniela Anticona Valderrama[2]; Edú Paredes Rojas[3]
[1]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, E14373@utp.edu.pe; C33126@utp.edu.pe
[2]Universidad Privada del Norte, Perú, daniela.anticona@*upn.pe*
[3]Universidad Científica del Sur, Perú, *eparedesr@cientifica.edu.pe*

Resumen– ***La gestión eficiente de residuos de tereftalato de polietileno (PET) requiere soluciones que reduzcan su volumen y optimicen las etapas de almacenamiento, transporte y valorización. El objetivo de este estudio fue diseñar y validar mediante simulación un sistema automatizado de compactación de botellas PET orientado a pequeñas empresas recicladoras. Se aplicó la metodología sistemática VDI 2221 para definir requerimientos, desarrollar la estructura funcional y elaborar el diseño detallado, mientras que la directriz VDI 2225 permitió evaluar alternativas mediante criterios técnicos y económicos ponderados. La solución seleccionada integró subsistemas mecánico, hidráulico, eléctrico y de control, modelados y simulados en Autodesk Inventor, FluidSIM y TIA Portal V16. El sistema fue redimensionado para procesar 55 kg por lote y una relación de reducción volumétrica de 4:1. Se adoptó una carga preliminar de diseño de 75 kN y se seleccionó un cilindro hidráulico de doble efecto de 80 mm de diámetro interno y vástago de 56 mm, con cabezal guiado lateralmente (factor de seguridad al pandeo cercano a 5.3). La presión requerida fue aproximadamente 14.9 MPa; con una presión nominal de 16 MPa y un caudal de 14 L/min, la carrera efectiva de compactación de 0.90 m se estimó en 19.4 s. Las simulaciones confirmaron la coordinación de la carga manual, trituración, detección de nivel, compactación y retorno del cilindro. Los resultados respaldan la viabilidad funcional del rediseño y constituyen una base para la construcción y validación experimental de un prototipo.***

Palabras clave- compactación de PET; gestión de residuos; diseño sistemático; automatización industrial; simulación.

I. Introducción

La gestión sostenible de residuos plásticos constituye uno de los principales desafíos ambientales y tecnológicos de la economía circular contemporánea, debido al crecimiento sostenido del consumo de polímeros, la limitada capacidad de recuperación de materiales y la persistencia ambiental de residuos como el tereftalato de polietileno, comúnmente conocido como PET. Este material, ampliamente utilizado en envases y botellas por su bajo peso, resistencia mecánica y facilidad de procesamiento, representa una fracción significativa de los residuos posconsumo que requieren estrategias de recuperación, clasificación, acondicionamiento y reincorporación a cadenas productivas. En este contexto, la literatura reciente destaca que el reciclaje de PET puede contribuir a reducir la dependencia de materias primas vírgenes, disminuir impactos ambientales asociados a la disposición final y fortalecer modelos de circularidad basados en el aprovechamiento de residuos valorizables [1]–[5]. No obstante, la eficiencia de estos procesos depende no solo de tecnologías avanzadas de reciclaje mecánico o químico, sino también de etapas previas como la recolección, segregación, reducción de volumen y acondicionamiento logístico del material, las cuales influyen directamente en los costos de transporte, almacenamiento y procesamiento [3], [6]–[9].

Diversos estudios recientes han abordado alternativas para mejorar el reciclaje de PET desde enfoques complementarios, incluyendo el reciclaje mecánico, el reciclaje químico, la evaluación de ciclo de vida, los sistemas inteligentes de recolección y las tecnologías digitales aplicadas a la gestión de residuos. Las investigaciones sobre reciclaje de PET han señalado que la calidad del material recuperado depende de la composición del residuo, la presencia de impurezas, las condiciones de pretratamiento y la eficiencia de los procesos de transformación [1], [2], [6], [8], [9]. Asimismo, los estudios sobre sistemas inteligentes de residuos evidencian que la integración de sensores, IoT, inteligencia artificial y dispositivos automatizados puede mejorar la clasificación, trazabilidad, monitoreo y participación ciudadana en los procesos de reciclaje [10]–[13]. Sin embargo, aunque estas investigaciones aportan avances relevantes en la digitalización y valorización de residuos plásticos, aún existe la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas intermedias, de bajo costo relativo y orientadas a pequeñas empresas recicladoras, especialmente aquellas que requieren compactar botellas PET para optimizar espacio, reducir manipulación manual y mejorar la eficiencia operativa antes del transporte o procesamiento posterior.

El problema central se relaciona con la limitada eficiencia en el acondicionamiento físico de botellas PET dentro de pequeñas y medianas empresas recicladoras, donde la recolección y clasificación suelen realizarse con recursos técnicos restringidos, alta intervención manual y baja capacidad de compactación. Esta situación incrementa el volumen ocupado por los residuos, eleva los costos logísticos y dificulta la acumulación de cantidades comercialmente atractivas para procesos de reciclaje o valorización. En este contexto, se propone el diseño de una máquina compactadora de botellas PET para pequeñas empresas recicladoras, considerando el diagnóstico del proceso, el dimensionamiento

de los subsistemas mecánico, eléctrico y de control, así como la validación de su funcionamiento mediante simulación. Desde la literatura científica, este problema se vincula con los límites operativos del reciclaje mecánico, la necesidad de mejorar la circularidad del PET, la importancia de reducir impactos ambientales mediante cadenas de recuperación más eficientes y la conveniencia de incorporar tecnologías de automatización y monitoreo en la gestión de residuos [4]–[8], [10], [12]. En consecuencia, el diseño de sistemas compactadores representa una alternativa técnica pertinente para mejorar la etapa de pretratamiento y acondicionamiento de residuos PET. Estudios sobre equipos de compactación aplicados a contenedores de residuos reciclables han mostrado que la reducción de volumen antes de la recolección disminuye el número de paradas de recolección y la energía asociada al transporte [19], [23].

La justificación del estudio se sustenta en su contribución ambiental, tecnológica y operativa. Desde el punto de vista ambiental, la compactación de botellas PET favorece la reducción de volumen, mejora la logística del reciclaje y contribuye a que una mayor cantidad de material pueda ser almacenada, transportada y valorizada en menor espacio. Desde el enfoque tecnológico, el diseño de una compactadora permite integrar criterios de ingeniería mecánica, selección de componentes, automatización, control y seguridad operativa, aspectos que resultan coherentes con las tendencias recientes de digitalización e inteligencia aplicada a la gestión de residuos [10]–[13]. Desde el enfoque práctico, la propuesta se orienta a empresas recicladoras que requieren soluciones funcionales y económicamente viables, alineadas con la circularidad del PET y con la reducción de impactos ambientales asociados a la disposición inadecuada de plásticos [1], [3], [5], [6], [9]. Además, el uso de una metodología estructurada de diseño permite organizar los requerimientos, seleccionar alternativas, dimensionar subsistemas y verificar el desempeño del sistema propuesto.

Por ello, el objetivo del presente artículo es diseñar un sistema de compactación de PET orientado a la sostenibilidad y eficiencia en la gestión de residuos, mediante el análisis de requerimientos funcionales, la selección conceptual de alternativas, el dimensionamiento de los subsistemas mecánico, eléctrico y de control, y la validación del funcionamiento mediante simulación. Con ello, se busca proponer una solución tecnológica aplicable a empresas recicladoras que permita reducir el volumen de botellas PET, optimizar la manipulación del material y contribuir al fortalecimiento de procesos de reciclaje más eficientes, sostenibles y técnicamente viables.

La principal contribución de este trabajo consiste en integrar la metodología sistemática de diseño VDI 2221 con un sistema automatizado de compactación de botellas PET que incorpora subsistemas mecánicos, hidráulicos y de control, cuya verificación funcional mediante simulación, complementada con el dimensionamiento analítico del circuito hidráulico, respalda la factibilidad técnica de la solución propuesta antes de la construcción del prototipo.

II. METODOLOGÍA

A. Enfoque y procedimiento de diseño

La investigación corresponde a un estudio aplicado de desarrollo tecnológico con enfoque cuantitativo y diseño no experimental, orientado al diseño y validación virtual de un sistema automatizado para la compactación de botellas de polietileno tereftalato (PET). El proceso metodológico integró actividades de ingeniería de diseño, análisis funcional, selección sistemática de alternativas, dimensionamiento de componentes y validación mediante simulación, sin la construcción de un prototipo físico.

El desarrollo del sistema se estructuró siguiendo la metodología VDI 2221 [21], ampliamente utilizada en el diseño sistemático de productos por proporcionar un proceso secuencial que relaciona las necesidades del usuario con la solución técnica final. Esta metodología facilita la trazabilidad entre los requerimientos funcionales, la generación de conceptos, la evaluación objetiva de alternativas y el diseño detallado de sistemas multidisciplinarios [14]–[17].

La evaluación de las alternativas conceptuales se realizó mediante la directriz VDI 2225 [22], empleando criterios técnicos y económicos ponderados para seleccionar la configuración con mayor desempeño global. Posteriormente, la solución seleccionada fue desarrollada mediante el dimensionamiento de los subsistemas mecánico, hidráulico, eléctrico y de control, considerando los requerimientos funcionales definidos para pequeñas empresas recicladoras.

Finalmente, el desempeño del sistema fue verificado mediante simulaciones desarrolladas en Autodesk Inventor, FluidSIM y TIA Portal V16. Estas herramientas permitieron validar la geometría del equipo, el comportamiento del circuito hidráulico y la secuencia de control implementada en el PLC, verificando la factibilidad funcional del diseño antes de la construcción del prototipo físico.

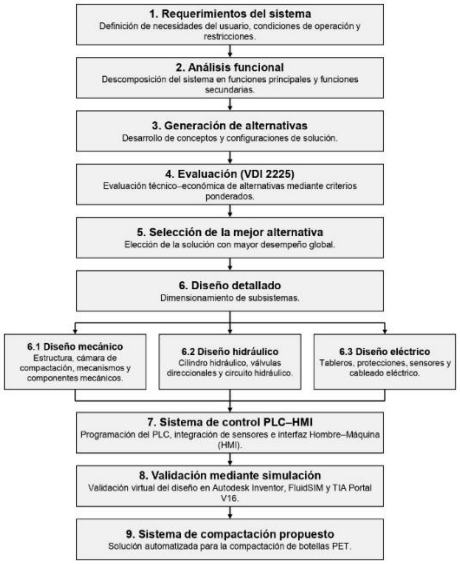


Fig. 1. Flujo metodológico adoptado para el diseño y la validación virtual del sistema automatizado de compactación de botellas PET basado en las metodologías VDI 2221 y VDI 2225.

B. Definición de requerimientos

En la primera etapa se establecieron los requerimientos funcionales y técnicos que debía satisfacer el sistema de compactación, considerando las necesidades operativas de pequeñas empresas dedicadas al reciclaje de botellas PET. Estas especificaciones constituyeron la base para el desarrollo del diseño conceptual y el dimensionamiento de los diferentes subsistemas.

Los requerimientos incluyeron la capacidad nominal de procesamiento, la relación de compactación esperada, las dimensiones de diseño del equipo, el tipo de accionamiento, el nivel de automatización, las condiciones de seguridad y los criterios de mantenimiento. Asimismo, se consideró que el sistema debía reducir la intervención manual durante el proceso de compactación, garantizar un funcionamiento continuo y facilitar la operación por parte del usuario.

La definición de estos requerimientos permitió establecer criterios objetivos para la generación y evaluación de alternativas de diseño, asegurando que la solución seleccionada cumpliera simultáneamente requisitos funcionales, operativos y constructivos. Este procedimiento es consistente con la metodología VDI 2221, donde las especificaciones iniciales constituyen el punto de partida para el desarrollo sistemático del producto [14]–[17].

TABLA I

Requerimientos de diseño del sistema propuesto de compactación de botellas PET

Requerimiento	Especificación de diseño	Propósito de ingeniería
Capacidad nominal	55 kg por lote	Adaptación a pequeñas empresas recicladoras
Relación de compactación	4:1 (Vi/Vf = 4)	Reducción del volumen para almacenamiento y transporte
Dimensiones de la cámara	1.00 × 1.00 × 1.60 m	Capacidad adecuada de carga
Accionamiento	Cilindro hidráulico de doble efecto	Generación de la fuerza de compactación
Fuente de potencia	Bomba hidráulica eléctrica	Operación continua
Sistema de control	PLC con interfaz HMI	Automatización del proceso
Sistema de detección	Sensor fotoeléctrico de nivel	Activación automática del ciclo
Material estructural	Acero ASTM A36 y acero inoxidable	Resistencia mecánica y durabilidad
Seguridad	Parada de emergencia e interbloqueo	Protección del operador
Mantenimiento	Componentes modulares	Facilidad de inspección y reemplazo

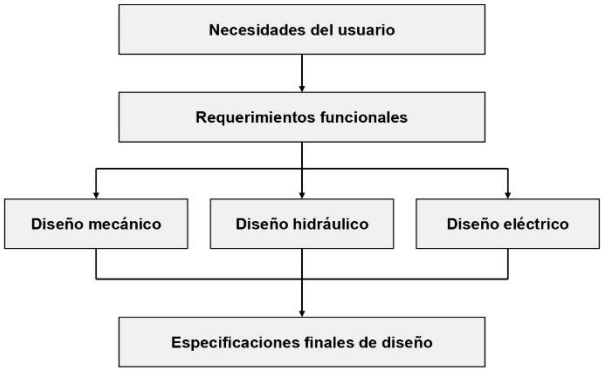


Fig. 2. Flujo de definición de requerimientos para el diseño del sistema automatizado de compactación de botellas PET.

C. Diseño funcional y conceptual

A partir de los requerimientos definidos, se desarrolló la estructura funcional del sistema con el propósito de identificar las funciones principales y las interacciones entre los subsistemas mecánico, hidráulico y de control. Este análisis permitió representar el flujo de material, energía e información desde el ingreso de las botellas PET hasta la obtención del material compactado.

La función global del sistema consiste en reducir el volumen de las botellas PET mediante un proceso automatizado de trituración inicial y compactación hidráulica. Para cumplir este objetivo, la función principal se descompuso en funciones parciales relacionadas con la alimentación del material, la detección del nivel de llenado, la trituración previa, la generación de fuerza hidráulica, el accionamiento del cilindro y el control secuencial del proceso mediante un PLC y una interfaz HMI.

Con base en esta estructura funcional se generaron cuatro alternativas conceptuales de diseño, las cuales fueron diferenciadas por la disposición de los mecanismos de alimentación, trituración y compactación. Posteriormente, dichas alternativas fueron evaluadas mediante la metodología VDI 2225 considerando criterios técnicos y económicos, seleccionándose la configuración que presentó el mejor equilibrio entre desempeño funcional, factibilidad de fabricación y costo de implementación.



Fig. 3. Estructura funcional del sistema automatizado de compactación de botellas PET.

TABLA II
Alternativas conceptuales evaluadas para el sistema de compactación de botellas PET

Alternativa	Características principales	Sistema de control	Resultado
A1	Alimentación manual, cilindro hidráulico de doble efecto, trituración previa	PLC + HMI	Seleccionada
A2	Tolva de alimentación, transmisión por engranajes	Microprocesador + OLED	No seleccionada
A3	Tornillo sin fin para pretrituración	Microprocesador	No seleccionada
A4	Alimentación inclinada y banda transportadora	Microprocesador + Monitor	No seleccionada

Se generaron cuatro alternativas conceptuales considerando diferentes configuraciones mecánicas y de control. Posteriormente, estas fueron evaluadas mediante la metodología VDI 2225, aplicando criterios técnicos y económicos ponderados. La Alternativa 1 obtuvo la mayor valoración global, por lo que fue seleccionada para el diseño detallado del sistema.

D. Evaluación y selección de alternativas

La selección de la alternativa de diseño se realizó mediante la metodología VDI 2225, la cual permite comparar soluciones conceptuales a partir de criterios técnicos y económicos previamente ponderados. Este procedimiento proporciona una evaluación objetiva del desempeño de cada propuesta y facilita la selección de la configuración que mejor satisface los requerimientos del sistema.

En la evaluación técnica se analizaron criterios relacionados con la ergonomía, geometría, funcionalidad, rapidez de operación, facilidad de fabricación, eficiencia de compactación, seguridad, mantenimiento, montaje y facilidad de operación. Paralelamente, la evaluación económica consideró el costo de materiales, el costo de mano de obra, el número de componentes, la facilidad de adquisición y el costo de mantenimiento. Los pesos asignados a cada criterio permitieron obtener un índice normalizado para cada alternativa, garantizando una comparación uniforme entre las soluciones propuestas.

Los índices obtenidos muestran que la Alternativa 1 alcanzó el mayor valor técnico (0.88) y el mayor valor económico (0.60), superando a las demás configuraciones evaluadas. En consecuencia, esta alternativa fue seleccionada para el desarrollo del diseño detallado por ofrecer el mejor equilibrio entre desempeño funcional, factibilidad constructiva y costo de implementación.

TABLA III
Evaluación técnico-económica de las alternativas de diseño mediante la metodología VDI 2225.

Alternativa	Valor técnico	Valor económico	Selección
A1	0.88	0.60	✓
A2	0.47	0.50	—
A3	0.45	0.35	—
A4	0.68	0.44	—

La evaluación evidencia que la Alternativa 1 alcanzó simultáneamente los mayores índices técnico y económico, lo que confirma que la incorporación de un sistema hidráulico de doble efecto controlado mediante PLC y HMI proporciona una solución equilibrada entre desempeño, facilidad de operación y viabilidad de implementación. Este resultado respalda la selección de dicha configuración para el desarrollo del diseño detallado y la posterior validación mediante simulación. No obstante, conforme a la práctica asociada a la evaluación técnico-económica de VDI 2225 [22], una valoración cercana a 0.8 se considera de alta calidad, mientras que valores inferiores a 0.6 resultan poco satisfactorios. Bajo este criterio, A1 presenta una valoración técnica alta (0.88), mientras que su valoración económica (0.60) se ubica en el límite inferior aceptable, lo que identifica el costo de implementación como el aspecto con mayor margen de mejora de la solución seleccionada.

E. Diseño detallado y validación virtual

Una vez seleccionada la alternativa de diseño mediante la metodología VDI 2225, se desarrolló el diseño detallado del sistema integrando los subsistemas mecánico, hidráulico, eléctrico y de automatización. El diseño mecánico comprendió el dimensionamiento de la cámara de compactación, la estructura portante y el mecanismo de compactación, considerando la capacidad nominal de procesamiento y las condiciones de operación establecidas durante la etapa de especificaciones. Paralelamente, el diseño hidráulico contempló la selección del cilindro de doble efecto, la bomba hidráulica, la válvula distribuidora y los elementos auxiliares necesarios para generar la fuerza de compactación requerida.

Posteriormente, se desarrolló el diseño eléctrico y la arquitectura del sistema de control utilizando un controlador lógico programable (PLC) y una interfaz hombre-máquina (HMI), integrando sensores fotoeléctricos para la detección del nivel de llenado y la ejecución automática del ciclo de compactación. La lógica de control fue estructurada para coordinar la alimentación del material, el accionamiento del triturador, la expansión y retracción del cilindro hidráulico, así como las condiciones de seguridad y parada de emergencia. La carga de botellas es manual (Tabla II): el operador vacía los envases en una tolva y el triturador, accionado por el PLC, alimenta la cámara con el material triturado. Cuando el sensor de nivel detecta la condición de cámara llena, el PLC detiene el motor del triturador, lo indica en la HMI y habilita el ciclo de compactación bajo las condiciones de interbloqueo definidas en la Tabla I.

La validación del diseño se realizó mediante simulaciones virtuales empleando Autodesk Inventor para verificar la configuración mecánica del equipo, FluidSIM para comprobar el funcionamiento del circuito hidráulico y TIA Portal V16 para evaluar la secuencia de control implementada en el PLC y la interacción con la interfaz HMI. Esta estrategia permitió verificar el funcionamiento integral del sistema antes de la construcción de un prototipo físico, reduciendo riesgos asociados al proceso de fabricación y facilitando la detección temprana de posibles inconsistencias de diseño.

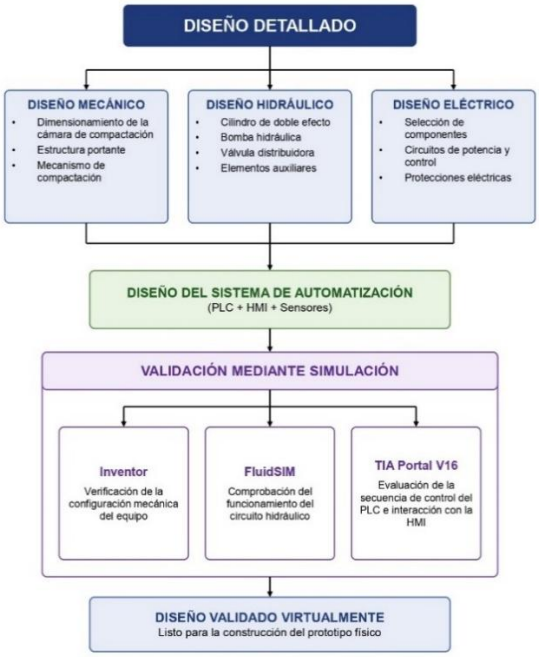


Fig. 4. Proceso de diseño detallado y validación virtual del sistema automatizado de compactación de botellas PET.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Diseño mecánico del sistema

Como resultado del proceso de diseño se obtuvo un sistema automatizado para la compactación de botellas de tereftalato de polietileno (PET), constituido por una estructura metálica, una cámara de compactación, un sistema hidráulico de accionamiento y un sistema de control basado en un controlador lógico programable (PLC) con interfaz hombre-máquina (HMI). La integración de estos subsistemas permitió desarrollar un equipo con carga manual y operación automatizada de trituración, detección, compactación y retorno del cilindro, orientado a reducir el volumen del material reciclado.

El redimensionamiento se realizó para una capacidad nominal de 55 kg de botellas PET por lote. Tomando como referencia una masa media de 29 g por envase [24], esta capacidad equivale a aproximadamente 1900 botellas; dicha equivalencia se empleó únicamente como referencia de capacidad y no para deducir el volumen ocupado. A partir del diseño antecedente de 50 kg [24], se incrementó la capacidad nominal en 10 % y se adoptó un volumen útil de carga de 1.20 m^3 dentro de una cámara de 1.00 m × 1.00 m × 1.60 m. Para una sección de 1.00 m^2, la altura inicial de llenado es 1.20 m y queda una holgura superior de 0.40 m. Definiendo la relación de reducción volumétrica como VRR = Vi/Vf = 4, la altura final es 0.30 m y la carrera efectiva de compactación es 0.90 m. Este volumen corresponde al material triturado y no a botellas enteras, cuyo volumen aparente, por los espacios vacíos entre envases, superaría el volumen útil adoptado. En consecuencia, el lote de 55 kg se compacta en un único ciclo, con una densidad aparente de llenado de aproximadamente 46 kg/m^3 y una densidad estimada del fardo de 183 kg/m^3, valores que deben confirmarse experimentalmente.

Para el redimensionamiento no se asumió una relación lineal entre la masa del lote y la fuerza de compactación. Se adoptó una carga preliminar de diseño Fd = 75 kN, cercana al valor empleado en el antecedente [24], cuya confirmación experimental se plantea para la etapa de prototipo. Con esta carga se evaluó un cilindro comercial de doble efecto con diámetro interno D = 80 mm y carrera nominal de 1.60 m. A la presión nominal del circuito de 16 MPa, el actuador puede desarrollar aproximadamente 80.4 kN, lo que equivale a un margen de 7 % respecto de la carga de diseño; por ello, la presión nominal se considera en la entrada del cilindro, y el ajuste de la válvula de alivio deberá cubrir las pérdidas de carga en válvulas y mangueras, así como la contrapresión del lado del vástago. El caudal de diseño se fijó en 14 L/min para mantener una carrera efectiva cercana a 20 s.

A partir de estos parámetros se determinaron las variables de operación del circuito hidráulico. El área del émbolo y la presión mínima requerida en la cámara del lado del émbolo se obtienen como:

$$A = \pi D^2/4 = 0.00503\ m^2 \quad (1)$$

$$p = Fd/A \approx 14.9\ MPa \quad (2)$$

Con el caudal de diseño Q = 14 L/min (0.000233 m^3/s), la velocidad de avance y el tiempo de la carrera efectiva de trabajo (s = 0.90 m) resultan:

$$v = Q/A \approx 0.0464\ m/s \quad (3)$$

$$t = s/v \approx 19.4\ s \quad (4)$$

Antes del contacto con el material, el cabezal recorre en vacío la holgura de 0.40 m (8.6 s), por lo que el avance total

hasta la altura final es de 1.30 m y dura aproximadamente 28.0 s. Con el vástago de 56 mm, el área anular es 0.00256 m² y el retorno de 1.30 m requiere unos 14.3 s, de modo que el ciclo hidráulico, sin considerar el tiempo de permanencia, es del orden de 42 s. A la presión nominal de 16 MPa, la potencia hidráulica es $P_h = p \cdot Q \approx 3.73$ kW; suponiendo un rendimiento global de la unidad de potencia de 0.80, la potencia mínima del motor es aproximadamente 4.67 kW, por lo que se propone una potencia comercial de 5.5 kW, sujeta a confirmación con la curva de la bomba.

Debido a la carrera del actuador, el vástago debe verificarse frente al pandeo. La condición más desfavorable se presenta al final de la compactación, con el vástago extendido 1.30 m y sometido a la carga de diseño. Para una comprobación preliminar se consideró acero con E = 200 GPa, una longitud entre apoyos L ≈ 3.1 m (longitud estimada de la camisa, 1.8 m, más el vástago extendido), un factor de longitud efectiva K = 0.5, correspondiente a un cabezal guiado lateralmente en la cámara, y un factor de seguridad n = 3.5. Bajo estos supuestos, el diámetro mínimo del vástago según Euler es:

$$d_{min} = [64 \cdot n \cdot Fd \cdot (K \cdot L)^2 / (\pi^3 \cdot E)]^{1/4} \approx 51 \text{ mm} \quad (5)$$

En consecuencia, se seleccionó un cilindro 80/56 (D = 80 mm, d = 56 mm), cuya carga crítica de Euler es aproximadamente 397 kN, lo que proporciona un factor de seguridad al pandeo de 5.3 con una esbeltez $\lambda = 4KL/d \approx 111$, dentro del rango de validez de la ecuación de Euler para aceros de vástago. El guiado del cabezal es una condición necesaria del diseño: sin él (K = 0.7), el factor de seguridad se reduciría a 2.7, por debajo del objetivo adoptado. La verificación final deberá realizarse con las condiciones reales de montaje y las curvas de pandeo del fabricante.

La estructura portante fue diseñada utilizando perfiles de acero ASTM A36, material seleccionado por sus propiedades mecánicas y disponibilidad comercial. Asimismo, el cabezal compactador incorpora una superficie dentada que sujeta el material durante la compresión y reduce su desplazamiento lateral; además, el cabezal se desplaza guiado por las paredes de la cámara, condición considerada en la verificación de pandeo del vástago.

TABLA IV
Parámetros de diseño mecánico del sistema automatizado de compactación de botellas PET

Parámetro	Valor
Capacidad nominal de procesamiento	55 kg/lote
Cantidad aproximada de botellas	≈1900 unidades
Volumen útil de diseño	1.20 m³
Dimensiones de la cámara	1.00 × 1.00 × 1.60 m
Carga de diseño	75 kN
Tipo de cilindro	Hidráulico de doble efecto
Diámetro interno del cilindro	80 mm
Carrera del cilindro	1.60 m
Caudal hidráulico	14.0 L/min (3.70 gpm)
Presión de trabajo (Ec. 2)	14.9 MPa requerida (160 bar nominal)
Velocidad de avance (Ec. 3)	0.0464 m/s
Tiempo de compactación / ciclo	19.4 s / ≈42 s
Potencia hidráulica / motor estimada	3.73 kW / 5.5 kW
Diámetro del vástago (Ec. 5)	56 mm (mínimo 51 mm; FS = 5.3)
Material estructural	Acero ASTM A36

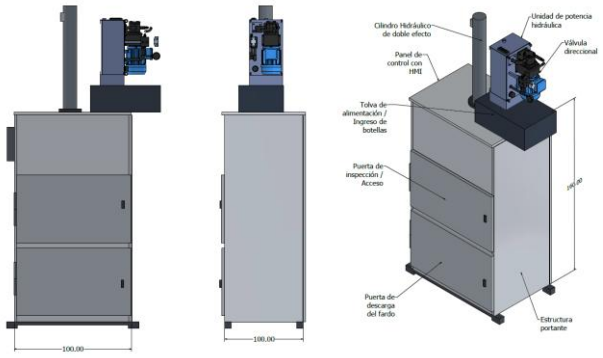


Fig. 5. Modelo tridimensional del sistema automatizado de compactación de botellas PET obtenido mediante Autodesk Inventor.

El diseño mecánico obtenido indica que es posible integrar los procesos de carga manual, trituración y compactación en un único equipo, manteniendo una configuración estructural compacta y adecuada para pequeñas empresas dedicadas al reciclaje de residuos plásticos. La capacidad nominal de 55 kg por lote y el redimensionamiento del sistema hidráulico satisfacen los requerimientos funcionales definidos para esta etapa. Asimismo, la selección de acero ASTM A36 y de un cabezal compactador con geometría dentada define la configuración estructural del equipo; la verificación de esfuerzos, deflexiones y factores de seguridad de la cámara, el cabezal y el bastidor se plantea como la siguiente etapa del desarrollo.

B. Sistema hidráulico y de control

Con base en los requerimientos establecidos durante la etapa de diseño, se desarrolló un sistema hidráulico capaz de suministrar la fuerza necesaria para el proceso de compactación mediante un cilindro hidráulico de doble efecto. El circuito está conformado por una unidad de potencia hidráulica, una bomba accionada por un motor eléctrico, una válvula direccional, válvulas de control y los elementos auxiliares requeridos para garantizar el suministro adecuado de presión y caudal durante el ciclo de operación. Esta configuración permite controlar de forma eficiente los movimientos de avance y retroceso del cilindro, con una aplicación controlada de la fuerza de compactación.

La automatización del proceso se implementó mediante un controlador lógico programable (PLC) Siemens S7-1200, encargado de coordinar la secuencia de operación del sistema. La lógica de control procesa la información proveniente de sensores fotoeléctricos encargados de detectar el nivel de llenado de la cámara de compactación, activando automáticamente el ciclo de trabajo cuando se alcanza la condición establecida.

Para facilitar la interacción entre el operador y el sistema, se desarrolló una interfaz hombre-máquina (HMI), mediante la cual es posible supervisar el estado de funcionamiento del equipo, iniciar o detener el proceso de compactación y

visualizar las principales variables operativas. La integración entre el PLC, la HMI y el sistema hidráulico permitió obtener un sistema automatizado con menor intervención manual y mayor repetibilidad durante el proceso de compactación.

Los principales componentes que integran el sistema hidráulico y de control se presentan en la Tabla V.

TABLA V
Componentes principales del sistema hidráulico y de control

Subsistema	Componentes principales	Función
Sistema hidráulico	Bomba hidráulica, cilindro de doble efecto, válvula direccional, depósito y mangueras	Generar y transmitir la fuerza de compactación
Sistema eléctrico	Motor eléctrico, protecciones y fuente de alimentación	Suministrar energía al sistema
Sistema de control	PLC Siemens S7-1200	Ejecutar la secuencia automática de operación
Sistema de supervisión	HMI	Supervisar el proceso e interactuar con el operador
Sensores	Sensores fotoeléctricos	Detectar el nivel de llenado y controlar el ciclo

La secuencia de funcionamiento del sistema automatizado se presenta en la Fig. 6.

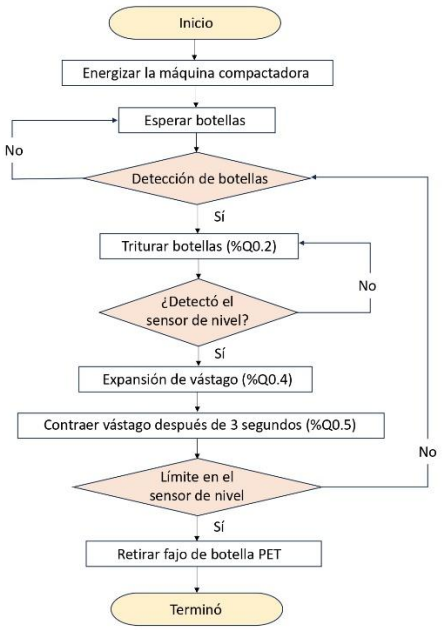


Fig. 6. Diagrama de funcionamiento del sistema automatizado de compactación de botellas PET.

Por otra parte, la arquitectura detallada del sistema de automatización implementado para el control del proceso de compactación se compone de cuatro subsistemas principales, cuyos componentes y funciones técnicas se desglosan en la Tabla VI.

TABLA VI
Arquitectura y componentes del sistema de automatización para el proceso de compactación.

Subsistema	Componente	Descripción Técnica / Función en el Sistema
Sistema de Control	PLC Siemens S7-1200	Unidad central de procesamiento encargada de ejecutar la lógica de automatización y coordinar los actuadores a partir de las señales de entrada.
	Pantalla HMI	Interfaz Hombre-Máquina que permite la visualización en tiempo real de las variables del proceso y la introducción de parámetros de operación.
	Sensores fotoeléctricos	Dispositivos de entrada destinados al monitoreo del nivel de llenado de la cámara mediante detección óptica.
Sistema Hidráulico	Unidad de potencia hidráulica	Suministra el flujo y la presión de aceite necesarios para el accionamiento de los actuadores del sistema.
	Válvula direccional	Electroválvula encargada de controlar la dirección del flujo hidráulico hacia las cámaras del cilindro.
	Cilindro hidráulico de doble efecto	Actuador lineal que ejecuta la fuerza mecánica necesaria para la compactación del material y el posterior retorno.
Sistema Eléctrico	Motor eléctrico	Unidad de accionamiento electromecánico para la bomba hidráulica.
	Protecciones y fuente de alimentación	Dispositivos de seguridad eléctrica (disyuntores, relés) y conversión de energía para la alimentación de los componentes de control.
Supervisión e Interacción	Operador / HMI	Estación de trabajo donde el personal técnico interactúa con el entorno gráfico para la supervisión y control del ciclo.

La integración del sistema hidráulico con el controlador lógico programable permitió automatizar la secuencia de compactación, reduciendo la intervención del operador y mejorando la repetibilidad del proceso. La utilización de sensores fotoeléctricos evita el inicio prematuro del ciclo de compactación, mientras que la interfaz HMI facilita la supervisión del estado del sistema y la interacción con el operador. En conjunto, la integración de los subsistemas mecánico, hidráulico y de control constituye el principal aporte tecnológico del diseño propuesto, al proporcionar una solución automatizada orientada a mejorar la eficiencia y seguridad del proceso de compactación de botellas PET.

C. Validación mediante simulación

La validación del sistema se realizó mediante simulaciones del modelo tridimensional, del circuito hidráulico y de la secuencia de operación implementada en el sistema de control. Esta etapa permitió verificar el funcionamiento coordinado de los subsistemas mecánico, hidráulico y de automatización antes de la construcción de un prototipo físico, reduciendo los riesgos asociados al diseño y facilitando la detección temprana de posibles inconsistencias. Cabe precisar que esta validación es de carácter funcional: verifica la configuración geométrica, el comportamiento del circuito hidráulico y la secuencia lógica de control, pero no sustituye el análisis de resistencia estructural de los componentes sometidos a la fuerza de compactación.

La simulación confirmó la correcta ejecución del ciclo de trabajo del equipo, iniciando con el encendido del sistema y la

trituración de las botellas PET cargadas en la tolva. Posteriormente, los sensores fotoeléctricos detectaron el nivel de llenado establecido, enviando la señal correspondiente al PLC para detener el motor del triturador y habilitar el cilindro hidráulico.

Los resultados obtenidos evidencian que la lógica de control implementada coordina adecuadamente la interacción entre los actuadores hidráulicos y los dispositivos de supervisión, garantizando una secuencia automática estable y repetible. Asimismo, la integración entre el modelo mecánico y el sistema de control permitió verificar el comportamiento funcional del diseño antes de su implementación física, disminuyendo la probabilidad de errores durante las etapas de fabricación y puesta en marcha.

La secuencia validada durante la simulación se presenta en la Tabla VII, donde se muestran las principales etapas del ciclo automático de compactación.

TABLA VII

Secuencia de validación del funcionamiento del sistema automatizado durante el ciclo de compactación.

Etapa	Fase del Ciclo	Descripción del Proceso
1	Encendido del sistema	Se enciende el sistema y queda listo para iniciar el ciclo de operación.
2	Trituración de botellas	El motor del triturador se activa y las botellas PET cargadas en la tolva son trituradas e ingresan a la cámara.
3	Detección de nivel (Cámara llena)	Al alcanzar el nivel establecido, el sensor fotoeléctrico envía la señal al PLC, que detiene el motor del triturador e indica en la HMI la condición de cámara llena.
4	Compactación	El PLC acciona la electroválvula para que el cilindro hidráulico se expanda y compacte el material triturado.
5	Retorno del cilindro	Finalizada la compactación, el cilindro hidráulico retorna a su posición inicial, quedando el sistema listo para un nuevo ciclo.

La validación mediante simulación confirmó que la lógica de control implementada ejecuta correctamente las etapas de encendido, trituración, detección del nivel de llenado, compactación y retorno del cilindro hidráulico. La coordinación entre el PLC, el sistema hidráulico y la interfaz HMI permitió desarrollar un ciclo automático estable y repetible para el proceso de compactación de botellas PET.

D. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos evidencian que la metodología VDI 2221 constituye una herramienta adecuada para el desarrollo sistemático de equipos automatizados destinados al reciclaje de residuos sólidos. La aplicación secuencial de las etapas de identificación de requerimientos, análisis funcional, generación y evaluación de alternativas, y diseño detallado permitió obtener una solución de ingeniería estructurada, reduciendo la incertidumbre durante el proceso de diseño y facilitando la integración de los subsistemas mecánico, hidráulico, eléctrico y de control.

Este enfoque es consistente con aplicaciones recientes del diseño sistemático orientado a materiales, en las que la definición estructurada de requerimientos, la evaluación de alternativas y la selección de soluciones permiten integrar criterios funcionales, mecánicos y de manufactura durante el desarrollo de componentes de ingeniería [18].

La integración del sistema mecánico con el accionamiento hidráulico y el control basado en un PLC Siemens S7-1200 permitió automatizar las etapas de detección de nivel, trituración, compactación y retorno del cilindro, manteniendo la carga de botellas como una operación manual supervisada. La incorporación de sensores fotoeléctricos y una interfaz HMI mejora la repetibilidad del proceso y reduce la intervención del operador durante el ciclo de compactación. Esta integración constituye uno de los principales aportes del trabajo al combinar accionamiento hidráulico, automatización industrial y supervisión en una solución orientada al reciclaje de botellas PET.

Desde el punto de vista del desempeño, el sistema fue redimensionado para una capacidad nominal de 55 kg por lote y una carga preliminar de diseño de 75 kN. El cilindro de 80 mm requiere aproximadamente 14.9 MPa para dicha carga y, con un caudal de 14 L/min, desarrolla una carrera efectiva de 0.90 m en aproximadamente 19.4 s, con un ciclo hidráulico completo del orden de 42 s. El vástago de 56 mm, con el cabezal guiado, presenta un factor de seguridad al pandeo cercano a 5.3. La validación mediante simulación permitió verificar el funcionamiento coordinado de los componentes mecánicos, hidráulicos y de control antes de la construcción del prototipo, disminuyendo la probabilidad de errores durante la fabricación.

La reducción de volumen mediante compactación puede incrementar la capacidad de almacenamiento y transporte, además de disminuir el consumo energético asociado a la recolección de residuos [19]. Asimismo, la metodología VDI 2221 permite incorporar criterios ambientales desde las etapas iniciales del diseño, fortaleciendo la sostenibilidad de la solución propuesta [20].

Los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones recientes orientadas al desarrollo de tecnologías para la gestión inteligente de residuos plásticos [10]–[13], las cuales destacan la importancia de integrar sistemas de automatización para mejorar la eficiencia operativa y reducir la intervención humana. Asimismo, el presente trabajo complementa dichos estudios al incorporar una metodología sistemática de diseño basada en la directriz VDI 2221, permitiendo estructurar el desarrollo del equipo desde la definición de requerimientos hasta la validación virtual del sistema.

Si bien la investigación se centra en la etapa de diseño y validación virtual, los resultados obtenidos proporcionan una base técnica para el desarrollo futuro de un prototipo físico y la evaluación experimental de variables como el consumo energético, el tiempo de ciclo, la eficiencia de compactación y la confiabilidad operativa. En este sentido, el trabajo no solo presenta una propuesta de diseño técnicamente fundamentada, sino también una metodología de desarrollo que puede adaptarse a proyectos similares orientados a la automatización de procesos de reciclaje y manejo de residuos sólidos.

El estudio presenta limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, la carga de diseño

de 75 kN y la relación de reducción volumétrica VRR = 4 requieren contraste experimental con la compresibilidad y recuperación elástica del PET procesado, así como con la densidad aparente del material triturado; si esta resultara menor que la supuesta, el lote de 55 kg podría requerir dos ciclos de carga y compactación, como se previó en el diseño antecedente [24]. En segundo lugar, la validación realizada es funcional y no incluye el análisis estructural completo de la cámara, el cabezal y el bastidor; la verificación de pandeo del vástago es preliminar y debe contrastarse con un cilindro comercial. En tercer lugar, el triturador no fue dimensionado en detalle y la evaluación VDI 2225 se reporta mediante índices globales. Finalmente, las funciones de seguridad deberán verificarse conforme a la normativa aplicable a maquinaria antes de la puesta en servicio.

IV. CONCLUSIONES

Se logró diseñar un sistema automatizado para la compactación de botellas PET orientado a pequeñas empresas recicladoras, cumpliendo el objetivo planteado mediante la aplicación de la metodología VDI 2221, integrando de manera sistemática los subsistemas mecánico, hidráulico, eléctrico y de control. La metodología permitió estructurar el proceso de diseño desde la identificación de requerimientos hasta la validación virtual del sistema, facilitando el desarrollo ordenado de la solución propuesta.

El diseño desarrollado cumplió los requerimientos establecidos para una capacidad nominal de procesamiento de 55 kg de botellas PET por lote y una carga preliminar de diseño de 75 kN. La selección de un cilindro de 80 mm conduce a una presión requerida de aproximadamente 14.9 MPa; con un circuito nominal de 16 MPa y un caudal de 14 L/min, la carrera efectiva de 0.90 m se completa en aproximadamente 19.4 s, y el vástago de 56 mm con cabezal guiado presenta un factor de seguridad al pandeo cercano a 5.3. El PLC y la interfaz HMI automatizan la detección de nivel, trituración, compactación y retorno del cilindro, manteniendo la carga del material como una operación manual supervisada.

La validación funcional mediante simulación confirmó la correcta coordinación entre los componentes mecánicos y el sistema de control, verificando la secuencia automática de operación antes de la fabricación del equipo. Este procedimiento permitió disminuir los riesgos asociados al desarrollo del prototipo; no obstante, la resistencia estructural de la cámara, el cabezal y el bastidor, así como la estabilidad del vástago con los datos del fabricante, deberán verificarse antes de la fabricación.

Como trabajo futuro se propone la construcción del prototipo físico y su evaluación experimental bajo condiciones reales de operación, considerando indicadores como el consumo energético, el tiempo de ciclo, la eficiencia de compactación y la confiabilidad del sistema, con el propósito de validar experimentalmente el desempeño del equipo y contrastar los resultados obtenidos mediante simulación.

REFERENCES

[1] T. M. Joseph, S. Azat, Z. Ahmadi, O. M. Jazani, A. Esmaeili, E. Kianfar, J. Haponiuk, and S. Thomas, "Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review," Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, vol. 9, Art. no. 100673, 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100673.

[2] M. Babaei, M. Jalilian, and K. Shahbaz, "Chemical recycling of Polyethylene terephthalate: A mini-review," Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 12, no. 3, Art. no. 112507, 2024, doi: 10.1016/j.jece.2024.112507.

[3] K. O. Babaremu et al., "Sustainable plastic waste management in a circular economy," Heliyon, vol. 8, no. 7, Art. no. e09984, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09984.

[4] N. Sakthipriya, "Plastic waste management: A road map to achieve circular economy and recent innovations in pyrolysis," Science of the Total Environment, vol. 809, Art. no. 151160, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151160.

[5] A. S. Pottinger et al., "Pathways to reduce global plastic waste mismanagement and greenhouse gas emissions by 2050," Science, vol. 386, no. 6726, pp. 1168–1173, 2024, doi: 10.1126/science.adr3837.

[6] S. Chairat and S. H. Gheewala, "Life cycle assessment and circularity of polyethylene terephthalate bottles via closed and open loop recycling," Environmental Research, vol. 236, Part 1, Art. no. 116788, 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.116788.

[7] M. Klotz, M. Haupt, and S. Hellweg, "Potentials and limits of mechanical plastic recycling," Journal of Industrial Ecology, vol. 27, no. 4, pp. 1043–1059, 2023, doi: 10.1111/jiec.13393.

[8] G. Santomasi, F. Todaro, A. Petrella, M. Notarnicola, and E. U. Thoden van Velzen, "Mechanical recycling of PET multi-layer post-consumer packaging: Effects of impurity content," Recycling, vol. 9, no. 5, Art. no. 93, 2024, doi: 10.3390/recycling9050093.

[9] G. Santomasi, R. Aquilino, M. T. Brouwer, S. De Gisi, I. Smeding, F. Todaro, M. Notarnicola, and E. U. Thoden van Velzen, "Strategies to enhance the circularity of non-bottle PET packaging waste based on a detailed material characterisation," *Waste Management*, vol. 186, pp. 293–306, 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.06.016.

[10] S. Munira, N. Paul, M. A. Alam, M. M. Rahman, and M. S. Kaiser, "Turning trash into treasure: Developing an intelligent bin for plastic bottle recycling," Journal of Social Computing, vol. 5, no. 1, pp. 1–14, 2024, doi: 10.23919/JSC.2024.0001.

[11] C.-M. Rosca and A. Stancu, "Innovative AIoT solutions for PET waste collection in the circular economy towards a sustainable future," Applied Sciences, vol. 15, no. 13, Art. no. 7353, 2025, doi: 10.3390/app15137353.

[12] A. Alourani, M. U. Ashraf, and M. Aloraini, "Smart waste management and classification system using advanced IoT and AI technologies," PeerJ Computer Science, vol. 11, Art. no. e2777, 2025, doi: 10.7717/peerj-cs.2777.

[13] V. Tundjungsari, B. P. D. Putranto, M. B. Ulum, and N. Anwar, "An integrated model for circular waste management using the Internet of Things, semantic web, and gamification (Circonomy): Case study in Indonesia," JMIR Serious Games, vol. 13, Art. no. e66781, 2025, doi: 10.2196/66781.

[14] D. Göhlich, B. Bender, T.-A. Fay, and K. Gericke, "Product requirements specification process in product development," *Proceedings of the Design Society*, vol. 1, pp. 2459–2470, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.507.

[15] D. C. Wynn and P. J. Clarkson, "Process models in design and development," *Research in Engineering Design*, vol. 29, pp. 161–202, 2018, doi: 10.1007/s00163-017-0262-7.

[16] C. Landschützer, F. Ehrentraut, and D. Jodin, "Containers for the Physical Internet: Requirements and engineering design related to FMCG logistics," *Logistics Research*, vol. 8, art. no. 8, 2015, doi: 10.1007/s12159-015-0126-3.

[17] J. Guérineau, M. Bricogne, L. Rivest, and A. Durupt, "Organizing the fragmented landscape of multidisciplinary product development: A mapping of approaches, processes, methods and tools from the scientific literature," *Research in Engineering Design*, vol. 33, pp. 307–349, 2022, doi: 10.1007/s00163-022-00389-w.

[18] D. Cocchi, L. Raimondi, T. M. Brugo, and A. Zucchelli, "A systematic material-oriented design approach for lightweight components and the CFRP motor wheel case study," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, pp. 2133–2153, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05756-2.

[19] A. A. Santos, A. F. da Silva, A. Gouveia, C. Felgueiras, and N. Caetano, "Reducing volume to increase capacity—Measures to reduce transport energy for recyclable waste collection," *Energies*, vol. 15, no. 19, art. no. 7351, 2022, doi: 10.3390/en15197351.

[20] L. Schilling, S. Spitzer, R. Kupfer, C. Klaus, and M. Gude, "Integrating environmental assessment into aerospace product development using the VDI 2221 methodology," *Discover Sustainability*, vol. 6, art. no. 809, 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01762-0.

[21] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2221 Blatt 1: Design of Technical Products and Systems—Model of Product Design. Düsseldorf, Germany: VDI, 2019.

[22] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2225 Blatt 3: Design Engineering Methodics—Engineering Design at Optimum Cost—Valuation of Costs. Düsseldorf, Germany: VDI, 1998.

[23] A. A. Santos, A. F. da Silva, A. Gouveia, N. Caetano, and C. Felgueiras, "Recyclable waste collection—Increasing ecopoint filling capacity to reduce energy for transportation," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 430–436, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.01.066.

[24] A. S. Valdivia López, "Diseño de una máquina compactadora de botella PET para empresas recicladoras," Tesis de título profesional, Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú, 2023.