Design and validation through simulation in Factory I/O of an automated system to classify recyclable waste by color in Llacanora, 2026

Malaver Ocas, Nancy Ximena[1]; Marín Acuña, Darían Omar[2]; Murrugarra Culqui, María Fernanda[3]; Peralta Alva, Aldair Arody[4]; Rivarola Ramos, Edison Yunino[5]

Universidad Privada del Norte, Perú, n00314747@upn.pe[1], n00294875@upn.pe[2], n00319071@upn.pe[3], n00327907@upn.pe[4], n00343451@upn.pe[5]

***Abstract*—**Solid waste management is a critical environmental challenge in communities with limited resources and scarce recycling infrastructure, such as the district of Llacanora, Cajamarca (Peru). This work presents the design and virtual validation of an automated conveyor system that classifies recyclable solid waste into three categories (plastic, paper/cardboard, and general waste) using color discrimination. The system was modeled and validated entirely in the Factory I/O industrial simulation environment, controlled by a virtual Siemens PLC programmed in TIA Portal and executed with S7-PLCSIM. Color detection is performed by the simulator vision sensor, whose signal drives pivoting deflectors that divert each item to its corresponding bin. Control is rule-based (classical PLC automation) and does not use artificial intelligence techniques. A simple factorial protocol with three belt-speed levels and n = 60 trials per category (N = 180) was executed. Virtual tests achieved an average classification accuracy of 93.9%, an error rate of 6.1%, an average total response time of 894 ms, and a system availability of 97.8%. Accuracy decreased from 98.3% to 88.3% as belt speed rose from 0.20 to 0.50 m/s, identifying the speed to detection-window trade-off as the main performance driver. The results, consistent with low-cost color-based sorters reported in the literature, suggest that virtual commissioning is an economical, safe, and reproducible strategy to verify the control logic of automated recycling systems at the design stage; physical validation is still required before field deployment.

Keywords*—*automated waste sorting, conveyor belt, Factory I/O, PLC, color detection, rule-based automation.

Diseño y validación mediante simulación en Factory I/O de un sistema automatizado para clasificar residuos reciclables por color en Llacanora, 2026

Malaver Ocas, Nancy Ximena[1]; Marín Acuña, Darían Omar[2]; Murrugarra Culqui, María Fernanda[3]; Peralta Alva, Aldair Arody[4]; Rivarola Ramos, Edison Yunino[5]

Universidad Privada del Norte, Perú, n00314747@upn.pe[1], n00294875@upn.pe[2], n00319071@upn.pe[3], n00327907@upn.pe[4], n00343451@upn.pe[5]

***Resumen*—*La gestión de residuos sólidos es un problema ambiental crítico en comunidades con pocos recursos y limitada infraestructura para reciclar, como el distrito de Llacanora, provincia de Cajamarca (Perú). Este trabajo presenta el diseño y la validación virtual de un sistema automatizado de cinta transportadora que clasifica residuos sólidos reciclables en tres categorías (plástico, papel/cartón y residuos generales) mediante la discriminación por color. El sistema se modeló y validó íntegramente en el entorno de simulación industrial Factory I/O, controlado por un PLC virtual Siemens programado en TIA Portal y ejecutado con S7-PLCSIM. La detección del color la realiza el sensor de visión del simulador, cuya señal acciona deflectores basculantes que desvían cada pieza al compartimento correspondiente. El control se basa en reglas programadas en el PLC (automatización clásica) y no emplea técnicas de inteligencia artificial. Se ejecutó un protocolo factorial simple con tres niveles de velocidad de banda y n = 60 ensayos por categoría (N = 180). Las pruebas virtuales alcanzaron una precisión de clasificación promedio de 93.9%, una tasa de error de 6.1%, un tiempo total de respuesta promedio de 894 ms y una disponibilidad del sistema de 97.8%. La precisión descendió de 98.3% a 88.3% al aumentar la velocidad de la banda de 0.20 a 0.50 m/s, lo que identifica la relación velocidad–ventana de detección como el principal factor de desempeño. Los resultados, coherentes con los clasificadores de bajo costo basados en color reportados en la literatura, sugieren que la puesta en marcha virtual es una estrategia económica, segura y reproducible para verificar la lógica de control de sistemas automatizados de reciclaje en la fase de diseño; su viabilidad en campo requiere una validación física posterior.*

Palabras clave*—*clasificación automatizada de residuos, cinta transportadora, Factory I/O, PLC, detección de color, automatización basada en reglas.

I. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos municipales (RSM) ha aumentado de forma sostenida en los últimos años debido al crecimiento poblacional, la urbanización y patrones de consumo poco sostenibles. A escala mundial se producen cada año cientos de millones de toneladas de residuos, y una fracción considerable no recibe tratamiento adecuado, lo que genera contaminación ambiental y riesgos para la salud pública [1]. En América Latina la situación se agrava por la limitada infraestructura para el manejo y el reciclaje de residuos [2].

En el Perú, según el Ministerio del Ambiente (MINAM), solo un porcentaje reducido de los residuos sólidos municipales se recicla formalmente, mientras que gran parte termina en botaderos informales o espacios públicos [3]. Esta realidad afecta especialmente a zonas rurales y comunidades con bajos recursos, donde la segregación en la fuente es mínima y depende en gran medida de recicladores informales [4], [5]. En particular, el distrito de Llacanora, provincia de Cajamarca (Perú), constituye una localidad representativa de esta problemática, en la que la falta de tecnología y de educación ambiental dificulta una gestión adecuada de los residuos; es en este distrito donde se proyecta implementar la presente propuesta.

Ante esta problemática, la automatización mediante tecnologías accesibles constituye una alternativa eficiente. Los sistemas de bandas transportadoras con detección por color y actuadores permiten segregar residuos reciclables de manera rápida y repetible [8], [9], [10]. Sin embargo, construir y depurar físicamente estos sistemas exige tiempo, materiales y presupuesto que muchas comunidades e instituciones educativas no poseen, y expone a errores costosos durante el ajuste de la lógica de control.

La puesta en marcha virtual (virtual commissioning) responde a esta limitación: permite diseñar, programar y verificar la lógica de control sobre un modelo tridimensional del sistema antes de cualquier despliegue físico, reduciendo costos y riesgos [21], [22], [24]. En este marco, el entorno Factory I/O, acoplado a un controlador lógico programable (PLC) virtual, se ha consolidado como una herramienta idónea para el diseño y la verificación de líneas automatizadas de clasificación [23], [24], [28].

Por ello, el presente trabajo propone el diseño y la validación exclusivamente virtual de un sistema automatizado de clasificación de residuos reciclables en tres categorías —plástico, papel/cartón y residuos generales— a partir de la discriminación por color, concebido como una propuesta para su futura implementación en el distrito de Llacanora, provincia de Cajamarca (Perú). El modelo se implementa en Factory I/O y se controla mediante un PLC virtual Siemens (TIA Portal + S7-PLCSIM), evaluando su precisión, sus tiempos de respuesta

y su disponibilidad bajo distintas velocidades de banda. El artículo se organiza en las siguientes secciones: planteamiento del problema, justificación, objetivos, antecedentes y estado del arte, marco teórico, metodología, resultados, discusión, conclusiones y recomendaciones. El alcance del trabajo es la automatización industrial basada en reglas, sin técnicas de inteligencia artificial, y su aporte es metodológico y aplicado, como se detalla en la Sección III-D.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A. Problema general

¿Es viable diseñar y validar en un entorno de simulación un sistema automatizado de cinta transportadora que clasifique residuos sólidos reciclables por color con una precisión y tiempos de respuesta adecuados, como paso previo y de bajo costo a su eventual despliegue en comunidades con limitada infraestructura tecnológica?

B. Problemas específicos

- ¿Qué arquitectura de detección y actuación resulta más adecuada para clasificar tres categorías de residuos (plástico, papel/cartón y generales) mediante discriminación por color dentro de un modelo simulado?
- ¿Qué nivel de precisión y qué tiempos de respuesta alcanza el sistema al ser controlado por un PLC virtual e integrado con la escena de Factory I/O?
- ¿Cómo influye la velocidad de la banda transportadora sobre la precisión de clasificación y sobre la disponibilidad del sistema?
- ¿Qué limitaciones metodológicas presenta la validación puramente virtual y cómo condicionan la interpretación de los resultados?

C. Impacto ambiental y social

La incorrecta segregación de residuos sólidos genera impactos ambientales severos, como la contaminación de suelos y fuentes de agua por lixiviados, la emisión de gases contaminantes y la pérdida de materiales reciclables con valor económico [2], [3]. Desde el punto de vista social, esta problemática repercute en las condiciones laborales de los recicladores informales, que a menudo trabajan sin organización ni medidas de seguridad adecuadas [5]. Validar soluciones tecnológicas de forma virtual, antes de invertir en hardware, permite anticipar su comportamiento y priorizar aquellas con mejor relación costo-beneficio para estos contextos.

III. JUSTIFICACIÓN

A. Justificación ambiental

La clasificación automatizada de residuos reciclables permite reducir la cantidad de desechos destinados a vertederos, disminuir la contaminación y promover el aprovechamiento de materiales reutilizables. Verificar la lógica de separación en un entorno virtual mejora la eficiencia del diseño y reduce errores antes de cualquier implementación, contribuyendo al cumplimiento de las políticas ambientales peruanas [3], [6].

B. Justificación económica

La puesta en marcha virtual evita el costo de construir y reconstruir prototipos durante la fase de diseño. Al depurar la lógica de control sobre un modelo tridimensional, se reducen el desperdicio de materiales, el tiempo de desarrollo y el riesgo de fallas costosas, lo que hace que la propuesta sea especialmente adecuada para instituciones y comunidades con presupuesto restringido [22], [24].

C. Justificación tecnológica

El enfoque muestra que es posible diseñar y verificar sistemas de automatización industrial empleando herramientas de simulación accesibles. El diseño modular del modelo facilita futuras integraciones —visión artificial, sensores espectrales o conectividad IoT— sin rediseñar el sistema completo, y su lógica de control puede transferirse a un PLC físico, previa adaptación del mapeo de entradas/salidas y de los tiempos de actuación, gracias a la compatibilidad de Factory I/O con plataformas estándar [23], [24], [27].

D. Aporte e innovación de la propuesta

La innovación de la propuesta no radica en un nuevo algoritmo de clasificación, sino en la aplicación metodológica de la puesta en marcha virtual a un problema de gestión de residuos en un contexto rural de recursos limitados. A diferencia de los trabajos previos, que construyen prototipos físicos con microcontroladores [8], [9], [10], [11] o emplean Factory I/O en líneas de clasificación de propósito industrial general [21], [23], este trabajo integra en un mismo flujo: (i) una codificación cromática operativa asociada a las categorías de residuos de la NTP 900.058:2019; (ii) una lógica de control desarrollada en un PLC industrial estándar, reutilizable en un equipo físico; y (iii) un protocolo experimental cuantitativo que caracteriza el compromiso entre velocidad de banda y precisión antes de adquirir cualquier hardware.

Para un municipio rural con recursos fiscales limitados como Llacanora, la ingeniería tradicional exige invertir en equipos de prueba antes de conocer el desempeño esperado. El enfoque propuesto permite depurar el diseño, dimensionar la inversión y reducir el riesgo financiero de fallas en la etapa de despliegue sin adquirir hardware de prueba. Se trata, por tanto, de una innovación de proceso orientada a la transferencia tecnológica y al desarrollo regional, alineada con el enfoque de emprendimiento e innovación de base local.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar y validar, mediante simulación en Factory I/O y control con un PLC virtual (TIA Portal + S7-PLCSIM), un sistema automatizado de cinta transportadora para la clasificación de residuos sólidos reciclables (plástico, papel/cartón y generales) por color, evaluando su precisión, tiempos de respuesta y disponibilidad en un contexto de bajos recursos.

B. Objetivos específicos

1) Modelar en Factory I/O la escena tridimensional del sistema de clasificación, integrando emisor de piezas,

banda transportadora, sensor de visión, deflectores y compartimentos.

2) Desarrollar la lógica de control en el PLC virtual para la detección de color y la activación automática de los deflectores, e integrarla con la escena mediante el enlace de entradas/salidas.
3) Determinar el efecto de la velocidad de la banda sobre la precisión de clasificación y la disponibilidad, mediante un protocolo experimental controlado.
4) Evaluar la precisión, la tasa de error y los tiempos de detección, actuación y respuesta total del sistema simulado.
5) Comparar los resultados obtenidos con los reportados por investigaciones afines basadas en clasificación por color y en simulación con Factory I/O.

V. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, diversas investigaciones han demostrado que los sistemas automatizados mejoran la clasificación de residuos sólidos reciclables. Los enfoques basados en visión artificial y aprendizaje profundo identifican materiales con alta exactitud, reportando valores entre 88% y 99% según el modelo y el conjunto de datos [13], [14], [15], [20]; no obstante, requieren cámaras, capacidad de cómputo y grandes conjuntos de entrenamiento, con costos poco accesibles para comunidades de bajos recursos.

Por ello, numerosos trabajos han optado por tecnologías más accesibles, como la detección por color combinada con controladores de bajo costo, logrando buenos resultados en la separación de plástico, papel y cartón [8], [9], [10], [11]. El uso de deflectores y bandas transportadoras ha permitido automatizar el proceso de manera eficiente y económica [12]. Revisiones recientes confirman el crecimiento sostenido de la investigación en clasificación inteligente de residuos en el marco de la Industria 4.0 [16], [17], [19].

El entorno Factory I/O se ha consolidado como una herramienta validada para el diseño y la verificación de líneas automatizadas de clasificación, ya que permite evaluar la lógica de control de forma determinista antes de su implementación física [21], [22], [23], [24]. Estudios que emplean Factory I/O acoplado a un PLC reportan sistemas de transporte y sorting con desempeños elevados verificados exclusivamente en simulación [21], [23]. En Latinoamérica, experiencias con clasificación mecánica han mostrado beneficios ambientales y económicos para cooperativas de reciclaje [26]. En el Perú, la clasificación de residuos se rige por la Norma Técnica Peruana NTP 900.058:2019 y por el marco normativo del sector [3], [6].

VI. MARCO TEÓRICO

La gestión de residuos sólidos comprende la recolección, clasificación, transporte y disposición final de los residuos. Dentro de este proceso, la segregación en la fuente es fundamental, ya que permite separar correctamente los materiales reciclables desde el lugar donde se generan [1], [3]. La economía circular promueve la reutilización y el reciclaje para reducir la contaminación y aprovechar mejor los recursos, y los sistemas automatizados facilitan una clasificación más rápida y consistente [7].

La discriminación por color es un principio de detección ampliamente utilizado en clasificadores de bajo costo: a partir de la respuesta espectral del objeto en las componentes roja, verde y azul (RGB) se decide su categoría [10], [11]. En este trabajo, dado que la validación es puramente virtual, dicho principio se representa mediante el sensor de visión de Factory I/O, que detecta el color de la pieza y entrega una señal discreta de categoría al controlador. Esta equivalencia funcional se declara explícitamente para garantizar la trazabilidad entre el principio de detección y su representación en la simulación.

Es necesario precisar que el sistema propuesto corresponde a automatización industrial clásica basada en reglas y no a una solución de inteligencia artificial (IA). Pese a su nombre, el sensor de visión de Factory I/O no procesa imágenes ni realiza visión artificial: identifica el tipo de pieza predefinido en el simulador y entrega un valor numérico discreto. El PLC compara ese valor con referencias fijas y ejecuta una secuencia tipo Grafcet en lenguaje escalera; toda decisión del sistema es determinista y está programada de forma explícita. No se emplean aprendizaje automático, redes neuronales, entrenamiento con datos ni inferencia estadística. Esta elección es deliberada: mantiene una arquitectura de baja complejidad computacional, ejecutable en PLC estándar y comprensible para el personal técnico local, y deja la incorporación de técnicas de IA (p. ej., visión artificial con redes neuronales convolucionales) como trabajo futuro (Sección XI). Las referencias a trabajos basados en IA [13]–[20] se incluyen solo como marco comparativo.

La puesta en marcha virtual consiste en verificar la lógica de control sobre un modelo tridimensional del sistema, emulando sensores y actuadores, antes de conectar el hardware real [22], [24]. Factory I/O proporciona escenas industriales tridimensionales (bandas, emisores, sensores, deflectores) que intercambian señales con un PLC. El PLC —en este caso un controlador Siemens virtual ejecutado con S7-PLCSIM y programado en TIA Portal— recibe las señales de los sensores y comanda los actuadores según la lógica implementada [27], [28]. Este esquema permite depurar el comportamiento del sistema de forma determinista, segura y reproducible.

TABLA I.

Codificación de color adoptada para las tres categorías

Color	Categoría de residuo	Ejemplos
Blanco	Plástico	Botellas PET, envases
Azul	Papel y cartón	Periódicos, cajas
Negro	Generales (no aprovechables)	No reciclables

Nota. Colores de la Tabla 2 de la NTP 900.058:2019, cuyo uso en el ámbito municipal admite la Nota 3 de dicha norma. La norma define los colores de los contenedores; en este trabajo se extienden a las bolsas de segregación. En la simulación, cada categoría se representa con un tipo de pieza predeterminado de Factory I/O (Sección VII-E).

VII. METODOLOGÍA

A. Tipo, enfoque y nivel de investigación

La investigación es de tipo aplicada o tecnológica, ya que busca diseñar y validar un sistema funcional para la clasificación automatizada de residuos reciclables. El enfoque es cuantitativo, orientado a medir variables como la precisión de clasificación, la velocidad de la banda, los tiempos de respuesta y la disponibilidad. El nivel es experimental-descriptivo, pues se realizan pruebas controladas modificando variables independientes (velocidad de la banda y color de la pieza) para evaluar el desempeño del sistema en el entorno virtual [25].

B. Diseño de investigación

Se emplea un diseño experimental basado en prototipado virtual iterativo, desarrollado en cuatro etapas: (i) análisis de requerimientos del sistema de clasificación; (ii) modelado de la escena tridimensional en Factory I/O y programación de la lógica de control en el PLC virtual; (iii) integración escena–PLC mediante el enlace de entradas/salidas; y (iv) ejecución del protocolo experimental y validación. Este diseño permite depurar progresivamente el modelo hasta alcanzar un funcionamiento estable [25].

C. Variables e indicadores

TABLA II.

VARIABLES E INDICADORES DEL ESTUDIO

Variable	Tipo	Indicador
Velocidad de la banda	Independiente	m/s
Color de la pieza	Independiente	Plást., papel, gen.
Precisión de clasificación	Dependiente	%
Tiempo de respuesta	Dependiente	ms
Tasa de error	Dependiente	%
Disponibilidad	Dependiente	%

D. Entorno de simulación y control

La validación funcional se realizó íntegramente en el entorno de simulación industrial Factory I/O, ampliamente empleado para el diseño, prueba y puesta en marcha virtual de sistemas automatizados de manipulación y clasificación de materiales [21], [23], [24], [28]. La plataforma reproduce la dinámica de una línea de clasificación —banda transportadora, detección por sensores y desvío mediante deflectores— y permite evaluar la lógica de control de forma determinista. El control se implementó en un PLC virtual Siemens programado en TIA Portal y ejecutado con S7-PLCSIM Advanced, acoplado a la escena mediante el enlace de entradas/salidas de Factory I/O [27], [28]. Esta arquitectura de software puede transferirse a un PLC físico con ajustes en el mapeo de E/S y en los temporizadores, lo que permite reutilizar la lógica verificada; no obstante, su desempeño con hardware real deberá confirmarse experimentalmente.

E. Correspondencia funcional

Dado que el objetivo es la validación virtual, el principio de discriminación por color se representa en la escena mediante el sensor de visión de Factory I/O, configurado para distinguir las tres categorías de residuo a partir del color de la pieza. La señal de identificación del entorno virtual cumple el rol funcional de un sensor de color físico. Esta equivalencia se declara de forma explícita para garantizar la trazabilidad entre el diseño y la simulación, y constituye a su vez una de las limitaciones del enfoque, que se discute en la Sección IX. Dado que Factory I/O no permite modificar el color de sus piezas predeterminadas, cada categoría de la Tabla I se asoció a un tipo de pieza del simulador: las piezas azules representan el plástico (blanco según la NTP) y activan la marca SORT BLUE, que acciona el Deflector 1; las piezas verdes representan el papel/cartón (azul según la NTP) y activan la marca SORT GREEN, que acciona el Deflector 2; y las piezas metálicas (de color gris), que no activan ninguna de estas marcas, representan los residuos generales o no aprovechables (negro según la NTP) y continúan sin desvío. La correspondencia se establece por categoría y no por color, por lo que los nombres de las variables del programa (Fig. 4) mantienen la denominación de los colores del simulador.

TABLA III.

Elementos de la escena virtual y su función

Elemento	Función en la escena	Representa
Emisor	Genera y libera piezas	Ingreso de residuos
Banda transportadora	Desplaza las piezas	Cinta transportadora
Sensor de visión	Detecta el color de la pieza	Sensor de color
Deflector 1	Desvía piezas de plástico	Compuerta de plástico
Deflector 2	Desvía piezas de papel/cartón	Compuerta papel/cartón
Compartimentos (×3)	Reciben las piezas	Contenedores por categoría
PLC virtual (PLCSIM)	Ejecuta la lógica de control	Controlador
Enlace de E/S	Intercambia señales digitales	Cableado / comunicación

F. Arquitectura del sistema

El sistema simulado se compone de tres subsistemas integrados (Fig. 1). El subsistema de escena tridimensional reúne los elementos de Factory I/O: emisor de piezas, banda transportadora, sensor de visión, deflectores basculantes y compartimentos. El subsistema de control está formado por el PLC virtual Siemens y el programa desarrollado en TIA Portal, que recibe las señales del sensor y comanda los actuadores según el color detectado. El subsistema de comunicación corresponde al enlace de entradas/salidas entre Factory I/O y S7-PLCSIM, que intercambia señales digitales de forma determinista. La Tabla III resume los elementos de la escena virtual y su función.

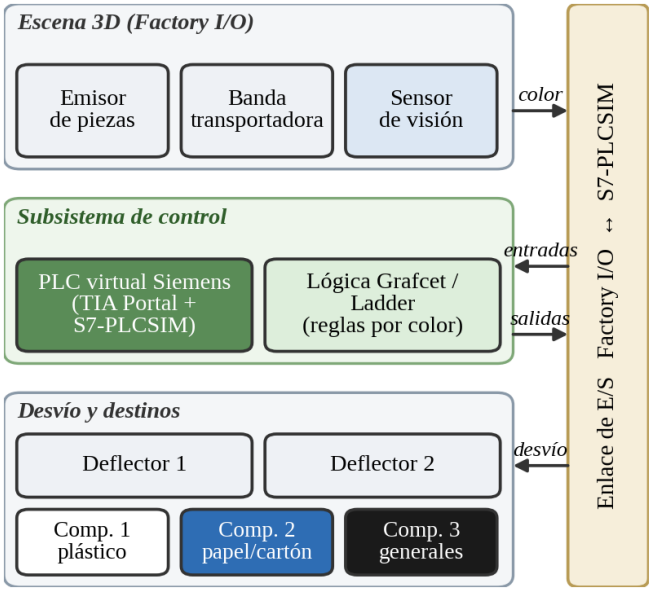


Fig. 1. Arquitectura funcional del sistema simulado de clasificación de residuos.

G. Flujo operativo del sistema

1) El emisor libera una pieza sobre la banda transportadora.
2) La banda desplaza la pieza hasta el rango del sensor de visión.
3) El sensor de visión detecta el color y entrega la señal de categoría al PLC.
4) El PLC evalúa la categoría y acciona el deflector correspondiente (o ninguno, para la categoría de paso directo).
5) La pieza es desviada al compartimento adecuado.
6) Un sensor de confirmación registra el ingreso al compartimento; el PLC incrementa el contador de la categoría y registra los indicadores del ciclo.

H. Lógica de control

La lógica de control se implementó como una secuencia tipo Grafcet traducida a lenguaje escalera (ladder) en el PLC virtual. El ciclo de control (Fig. 2) inicializa la banda y los deflectores en su posición de reposo; al detectar una pieza en el sensor de visión, lee su color y decide la categoría: la categoría plástico (blanco) activa el Deflector 1, la categoría papel/cartón (azul) activa el Deflector 2 y la categoría de residuos generales (negro) no activa deflectores, dejando pasar la pieza al compartimento de residuos generales. Tras la confirmación del desvío, el PLC incrementa el contador de la categoría, registra los tiempos del ciclo y retorna al estado de espera para la siguiente pieza.

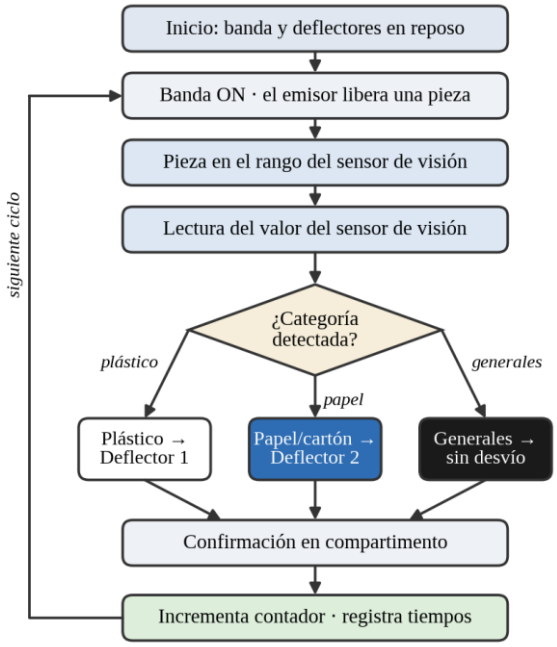


Fig. 2. Diagrama de flujo de la lógica de control ejecutada en el PLC virtual.

I. Protocolo de validación virtual

Se empleó un diseño factorial simple con dos factores controlados: tipo de residuo (plástico, papel/cartón y generales) y velocidad de la banda (tres niveles: 0.20, 0.35 y 0.50 m/s). Para cada categoría se ejecutaron n = 60 repeticiones, distribuidas equitativamente entre los tres niveles de velocidad, totalizando N = 180 ensayos. Los indicadores se definieron como sigue: precisión (%) = (clasificaciones correctas / total de la categoría) × 100; tasa de error (%) = 100 − precisión; tiempo de detección (ms) = intervalo entre el ingreso de la pieza al rango del sensor y la emisión de la señal de categoría; tiempo de actuación (ms) = intervalo entre la señal y la finalización del desvío; tiempo total = detección + actuación; disponibilidad (%) = (ciclos sin fallo / ciclos totales) × 100. Una pieza se considera correctamente clasificada si es desviada al compartimento de su categoría dentro del mismo ciclo, sin atascos ni desvíos múltiples.

VIII. RESULTADOS

A partir de la ejecución del protocolo en Factory I/O se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación. Los resultados cuantitativos (subsecciones B a F) provienen de los N = 180 ensayos registrados por el PLC virtual.

A. Modelado de la escena y programación del PLC

La Fig. 3 muestra la escena tridimensional construida en Factory I/O, con la banda principal, el sensor de visión montado en pórtico, los desviadores con sus bandas de salida y el panel de mando. La Fig. 4 presenta segmentos representativos del programa en lenguaje escalera desarrollado en TIA Portal: (a) el arranque de las bandas transportadoras; (b) la transferencia del valor del sensor de visión a un registro de datos y su comparación para activar el bit de memoria de la categoría

correspondiente; y (c) el reinicio del desviador cuando el sensor de salida confirma el paso de la pieza. Los nombres de las variables conservan la denominación en inglés de los colores de las piezas del simulador, según la correspondencia descrita en la Sección VII-E (SORT BLUE: plástico; SORT GREEN: papel/cartón; pieza metálica sin marca: generales).

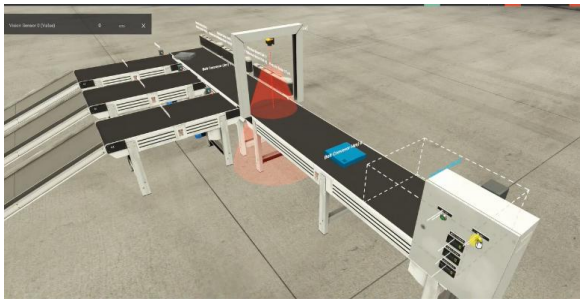
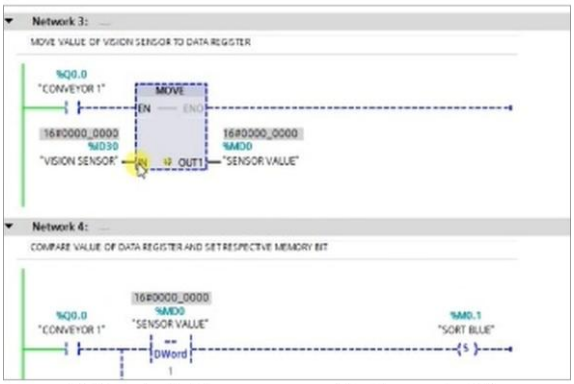


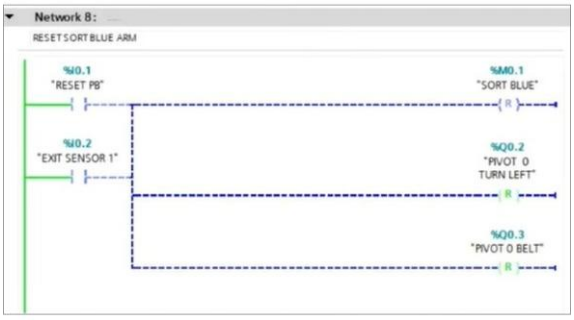
Fig. 3. Escena tridimensional del sistema de clasificación modelada en Factory I/O.



(a) Network 2: arranque de las bandas transportadoras



(b) Networks 3–4: lectura y comparación del sensor de visión



(c) Network 8: reinicio del desviador por sensor de salida

Fig. 4. Segmentos representativos del programa ladder en TIA Portal: (a) arranque de bandas, (b) lectura y comparación del valor del sensor de visión y (c) reinicio del desviador.

B. Resultados de clasificación

La Tabla IV presenta la precisión de clasificación por tipo de residuo. El sistema alcanzó una precisión promedio de 93.9%, con el mejor desempeño en la categoría plástico (96.7%) y el menor en residuos generales (91.7%). La Fig. 5 ilustra estos resultados frente al promedio global.

TABLA IV.

Precisión de clasificación por tipo de residuo

Tipo de residuo	Ensayos (n)	Correctas	Precisión (%)
Plástico (blanco)	60	58	96.7
Papel/cartón (azul)	60	56	93.3
Generales (negro)	60	55	91.7
Total / Promedio	**180**	**169**	**93.9**

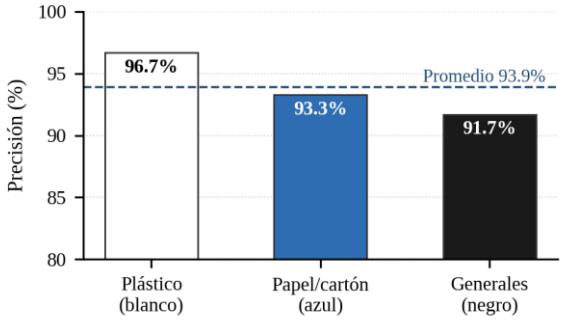


Fig. 5. Precisión de clasificación por tipo de residuo.

C. Matriz de confusión

La Tabla V muestra la matriz de confusión agregada. Los errores se deben principalmente a desfases entre la lectura del sensor y el accionamiento o retorno del desviador, que aumentan con la velocidad de la banda (subsección E).

TABLA V.

Matriz de confusión agregada (N = 180)

Real \ Clasificado	Plástico	Papel/cartón	Generales
Plástico	58	2	0
Papel/cartón	3	56	1
Generales	2	3	55

Nota. La diagonal representa los aciertos (169 de 180). Los errores se asocian principalmente a desfases entre la detección y el accionamiento del desviador.

D. Tiempo de respuesta

La Tabla VI reporta los tiempos de detección, actuación y respuesta total sobre una muestra representativa de ciclos. El tiempo total de respuesta promedio fue de 894 ms, dominado por la fase de actuación de los deflectores (742 ms).

TABLA VI.

Tiempos de detección, actuación y respuesta total (ms)

Prueba	Detección	Actuación	Total
1	148	735	883
2	156	748	904
3	141	726	867
4	162	755	917
5	150	740	890
6	145	731	876
7	159	752	911
8	138	720	858
9	167	760	927
10	153	744	897
11	149	738	887
12	156	751	907
Promedio	**152**	**742**	**894**

E. Efecto de la velocidad de la banda

La Tabla VII muestra el efecto de la velocidad de la banda sobre la precisión. La precisión desciende de 98.3% a 0.20 m/s hasta 88.3% a 0.50 m/s, ya que a mayor velocidad se reduce la ventana temporal de detección y el número de lecturas por pieza.

TABLA VII.

Efecto de la velocidad de la banda sobre la precisión

Velocidad (m/s)	Ensayos (n)	Correctas	Precisión (%)
0.20	60	59	98.3
0.35	60	57	95.0
0.50	60	53	88.3
Total	**180**	**169**	**93.9**

F. Indicadores globales de desempeño

La Tabla VIII sintetiza los indicadores globales de desempeño.

TABLA VIII.

Indicadores globales de desempeño del sistema

Indicador	Resultado
Precisión promedio (%)	93.9
Tasa de error (%)	6.1
Tiempo de detección promedio (ms)	152
Tiempo de actuación promedio (ms)	742
Tiempo total de respuesta promedio (ms)	894
Disponibilidad del sistema (%)	97.8
Rendimiento (piezas/min)	14.2

IX. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el entorno de simulación indican que un sistema de clasificación basado en detección por color, banda transportadora y deflectores controlados por un PLC constituye, en la fase de diseño y verificación virtual, una alternativa viable para la segregación automatizada de residuos reciclables. La precisión promedio alcanzada, de 93.9%, se ubica dentro del rango reportado por trabajos previos que emplean detección por color para separar plástico, papel y cartón [8], [9], [10], [11], en los que se reportan precisiones típicas entre 85% y 95% bajo condiciones controladas. El valor obtenido es, por tanto, coherente con el estado del arte para esta familia de soluciones.

Al comparar con enfoques de mayor complejidad, la literatura basada en visión artificial y redes neuronales convolucionales reporta exactitudes superiores, frecuentemente entre 88% y 99% [13], [14], [15]. Sin embargo, dichos sistemas requieren cámaras, capacidad de cómputo y conjuntos de datos de entrenamiento, con costos poco accesibles para comunidades rurales y de bajos recursos. El enfoque propuesto sacrifica una fracción de exactitud a cambio de una reducción drástica de costo y complejidad, lo que constituye su principal ventaja en el contexto objetivo del estudio. Dado que el sistema propuesto no incorpora técnicas de IA, esta comparación debe entenderse como una referencia de desempeño y no como una equivalencia metodológica.

El uso de Factory I/O como herramienta de validación aportó beneficios metodológicos relevantes. La plataforma permitió evaluar la lógica de control de manera determinista, reproducir el flujo operativo completo y someter el sistema a casos límite —ausencia de pieza, ingreso simultáneo de varias piezas y variación de la velocidad de banda— sin riesgo ni costo de hardware [22], [23], [24]. La evidencia de trabajos afines respalda la idoneidad de Factory I/O para la puesta en marcha virtual de líneas de clasificación, incluso reportando desempeños elevados en sistemas validados exclusivamente en este entorno [21], [23]. Ello sustenta el empleo de la simulación como etapa previa y complementaria al despliegue físico, y no como sustituto definitivo de él.

El análisis del efecto de la velocidad (Tabla VII) revela el principal factor de desempeño: al aumentar la velocidad de la banda de 0.20 a 0.50 m/s, la precisión cae de 98.3% a 88.3%. Este comportamiento se explica porque una banda más rápida reduce la ventana temporal en que la pieza permanece en el rango del sensor, disminuyendo el número de lecturas y el margen de tiempo disponible para accionar el desviador. Existe, por tanto, un compromiso entre el rendimiento (piezas por minuto) y la precisión que debe ajustarse según los requisitos operativos.

En el entorno simulado, los errores observados (Tabla V) se deben principalmente a la sincronización entre la detección y la actuación: cuando la pieza avanza con mayor rapidez, el desviador no alcanza a accionarse, o a retornar a su posición de reposo, antes de que la pieza llegue a la zona de desvío, por lo que esta termina en un compartimento incorrecto. Este mecanismo explica la caída de precisión con la velocidad (Tabla VII) y podría mitigarse ajustando los temporizadores de actuación o aumentando la distancia entre el sensor y los desviadores. En una implementación física se sumarían fuentes de error que la simulación no reproduce: la variación de la iluminación y la suciedad, las etiquetas o las deformaciones de los residuos, que alteran la lectura de un sensor de color real [11], además del ruido eléctrico, las vibraciones y el desgaste mecánico.

La idealización del entorno es la limitación más importante del trabajo: al tratarse de una validación puramente virtual, los

resultados representan un límite superior optimista del desempeño. Una eventual verificación con hardware podría mostrar precisiones algo menores, como advierten los propios trabajos basados en Factory I/O [21]. Asimismo, la representación del sensor de color mediante el sensor de visión del simulador, aunque funcionalmente equivalente, no captura la sensibilidad del hardware real a la iluminación. Estas limitaciones acotan el alcance de las conclusiones a la fase de diseño y verificación virtual.

Pese a ello, el enfoque presenta ventajas claras. La puesta en marcha virtual elimina el costo de prototipado durante el diseño, lo que favorece su replicabilidad en contextos de recursos limitados; el diseño modular facilita futuras integraciones (visión artificial, sensores espectrales o IoT) sin rediseñar el sistema; y la lógica de control verificada puede reutilizarse en un PLC físico con ajustes de E/S y temporización. Para comunidades rurales como el distrito de Llacanora, provincia de Cajamarca, disponer de un diseño verificado virtualmente y de bajo costo antes de invertir en hardware reduce el riesgo técnico de una eventual implementación.

X. CONCLUSIONES

1) Se modeló en Factory I/O la escena tridimensional del sistema de clasificación —emisor, banda transportadora, sensor de visión, deflectores y compartimentos—, demostrando la factibilidad de integrar estos elementos en una arquitectura modular controlada por un PLC virtual.
2) Se desarrolló e integró la lógica de control en el PLC virtual (TIA Portal + S7-PLCSIM), basada en reglas y sin técnicas de inteligencia artificial, verificada de forma determinista, que completó el ciclo detección–decisión–actuación con una disponibilidad del sistema de 97.8%.
3) Se determinó el efecto de la velocidad de la banda sobre el desempeño: la precisión descendió de 98.3% (0.20 m/s) a 88.3% (0.50 m/s), identificando la relación velocidad–ventana de detección como el principal factor de desempeño.
4) Se evaluó la precisión de clasificación, que alcanzó un promedio de 93.9% con una tasa de error de 6.1% y un tiempo total de respuesta promedio de 894 ms, cifras coherentes con el rango reportado por sistemas de bajo costo basados en detección por color [8], [9], [10], [11].
5) Se compararon los resultados con investigaciones afines, lo que sugiere que el sistema propuesto ofrece, en el entorno simulado, un compromiso favorable entre costo, complejidad y precisión frente a las soluciones basadas en visión artificial.
6) La validación mediante simulación en Factory I/O demostró la viabilidad lógica y operativa del sistema sin costo de hardware; sin embargo, los resultados representan un límite superior optimista del desempeño, propio de un modelo idealizado. Las conclusiones sobre la viabilidad técnica en campo quedan supeditadas a una validación hardware-in-the-loop y a un piloto físico que cuantifiquen la brecha frente a las perturbaciones del entorno real.
7) En conjunto, los resultados respaldan la viabilidad, en fase de diseño y verificación virtual, de una solución de clasificación automatizada de residuos económica, reproducible y adaptable, potencialmente apropiada para comunidades con infraestructura tecnológica limitada como el distrito de Llacanora, provincia de Cajamarca (Perú), donde se proyecta su implementación una vez validada físicamente.

XI. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

1) Realizar una validación hardware-in-the-loop (HIL), conectando la lógica verificada a un PLC físico y a sensores reales, para cuantificar la brecha entre la simulación y la realidad, incluido el efecto de la iluminación y del estado de los residuos (suciedad, etiquetas, deformaciones) sobre la detección de color.
2) Complementar o reemplazar la detección por color con visión artificial y modelos de aprendizaje profundo (CNN) dentro del mismo entorno de simulación, reduciendo la dependencia del color de la pieza [14], [15].
3) Evaluar en simulación sensores espectrales de infrarrojo cercano (NIR) de bajo costo para discriminar tipos de plástico más allá del color [18].
4) Ampliar la escena para clasificar categorías adicionales (vidrio, metal y orgánicos) conforme a la NTP 900.058:2019 [6].
5) Integrar en el modelo un módulo de comunicación (Wi-Fi/Bluetooth) que registre y transmita los datos de clasificación en tiempo real, habilitando monitoreo remoto y trazabilidad (IoT).
6) Analizar sistemáticamente el compromiso entre velocidad de banda, rendimiento y precisión para determinar el punto de operación óptimo según la demanda de cada comunidad.

REFERENCIAS

[1] World Bank, What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC, USA: World Bank, 2018.

[2] D. Hoornweg and P. Bhada-Tata, What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management, Urban Development Series KP No. 15. Washington, DC, USA: World Bank, 2012.

[3] Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM), Informe Anual de Residuos Sólidos Municipales 2021. Lima, Perú: MINAM, 2022.

[4] L. A. Guerrero, G. Maas, and W. Hogland, "Solid waste management challenges for cities in developing countries," Waste Manag., vol. 33, no. 1, pp. 220–232, 2013.

[5] M. Medina, "The informal recycling sector in developing countries," Gridlines Note No. 44, PPIAF/World Bank, Washington, DC, USA, 2008.

[6] Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM), NTP 900.058:2019 — Gestión de residuos: Código de colores. Lima, Perú: INDECOPI, 2019.

[7] Ellen MacArthur Foundation, Towards the Circular Economy. Cowes, U.K.: EMF, 2013.

[8] T. Adiono, S. Fuada, and R. Pradana, "Low-cost automatic waste sorting system using Arduino with infrared sensors," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 673, no. 1, p. 012007, 2019.

[9] O. W. Bello, O. M. Amoo, and A. O. Adeniyi, "Design and implementation of a waste segregation system using Arduino microcontroller," Int. J. Eng. Res. Technol., vol. 9, no. 6, pp. 1043–1048, 2020.

[10] A. Kumar and S. Hasibuan, “Automatic solid waste sorting system using Arduino and TCS3200 color sensor,” J. Phys. Conf. Ser., vol. 2394, no. 1, p. 012013, 2022.

[11] Q. T. Pham, V. T. Nguyen, and T. M. Le, “Color classification for automated recycling systems using TCS230 sensor and PID control,” Int. J. Electr. Comput. Eng., vol. 11, no. 4, pp. 3154–3162, 2021.

[12] S. P. Gundupalli, S. Hait, and A. Thakur, “A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling,” Waste Manag., vol. 60, pp. 56–74, 2017.

[13] A. H. Vo, L. H. Son, M. T. Vo, and T. Dao, “A novel framework for trash classification using deep transfer learning,” IEEE Access, vol. 7, pp. 178631–178639, 2019.

[14] M. I. B. Ahmed et al., “Deep learning approach to recyclable products classification: Towards sustainable waste management,” Sustainability, vol. 15, no. 14, p. 11138, 2023.

[15] W. L. Mao, W. C. Chen, C. T. Wang, and Y. H. Lin, “Recycling waste classification using optimized convolutional neural network,” Resour. Conserv. Recycl., vol. 164, p. 105132, 2021.

[16] T. W. Wang, H. Zhang, W. Peng, F. Lü, and P. J. He, “Applications of convolutional neural networks for intelligent waste identification and recycling: A review,” Resour. Conserv. Recycl., vol. 190, p. 106813, 2023.

[17] S. M. Cheema, A. Hannan, and I. M. Pires, “Smart waste management and classification systems using cutting edge approach,” Sustainability, vol. 14, no. 16, p. 10226, 2022.

[18] U. Martinez-Hernandez, G. West, and T. Assaf, “Low-cost recognition of plastic waste using deep learning and a multi-spectral near-infrared sensor,” Sensors, vol. 24, no. 9, p. 2821, 2024.

[19] Sensors Editorial Team, “A systematic review of AI-based techniques for automated waste classification,” Sensors, 2025.

[20] “Intelligent waste sorting for urban sustainability using deep learning,” Sci. Rep., 2025. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/s41598-025-08461-w

[21] “Design and simulation of a PLC-controlled omni-wheel conveyor sorting system for high-speed material handling,” Sci. Rep., 2026. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/s41598-025-13164-3

[22] “Simulation and optimization of material handling systems using Factory I/O for industrial automation,” Int. J. Res. Sci. Innov. (IJRSI), 2025.

[23] “Approach to sorting line control using PLC and Factory I/O,” Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng. (IJITEE), vol. 13, no. 10, 2024.

[24] “Factory I/O: A modern PLC simulation tool to learn the fundamentals,” Control.com Technical Articles, 2025.

[25] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, Metodología de la investigación, 6th ed. México D.F., México: McGraw-Hill, 2014.

[26] C. Ferraz, P. A. Leme, and M. Zanin, “Impact of mechanical sorting on recycling cooperatives in São Paulo State,” Resour. Conserv. Recycl., vol. 142, pp. 148–157, 2019.

[27] Siemens AG, SIMATIC S7-PLCSIM Advanced — Function Manual. Nuremberg, Germany: Siemens, 2022.

[28] Real Games, Factory I/O — User Guide. Braga, Portugal: Real Games, 2023.