Assessment and design of an automated system to improve productivity in the rice dosing stage

Priscila S. Mejía Uchofen, Industrial Engineer[1]; Robert S. Torres del Águila, Industrial Engineer [2]; Martha E. Tesen Arroyo, Master's Degree[3]; Joselito Sánchez Pérez, Master's Degree[4]
[1,2,3,4]Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, priscilamejiauchofen@gmail.com, torresdelaguilarobert@gmail.com, mtesen@usat.edu.pe, jsanchez@usat.edu.pe,

The purpose of this research was to design an automated system to improve productivity in the rice-dosing stage at the study company. The manual process exhibited high cycle times, raw material waste due to overweight, and ergonomic risks due to the handling of 49 kg loads. To address this problem, the study began with a diagnosis using industrial time-study chronometry, identifying a cycle time of 24.46 s per bag, a productivity of 184 bags/operator×day, and a waste rate of 1,24% that generated an annual loss of S/ 526 080. Subsequently, an automated system was designed, consisting of a dosing hopper with load cells, pneumatic gates, a conveyor belt, and an automatic sewing machine, controlled by a PLC with a closed loop ON/OFF control. The mechanical design was modeled in SolidWorks, the electrical blueprint was drawn in AutoCAD, and the control logic was programmed and simulated in SoMachine, which allowed validating the logical sequence of the control program. The improvement proposal projected a reduction in the cycle time to 9,00 s per bag, an increase in productivity to 400 bags/operator×day, the elimination of manual load lifting, and a decrease in waste to 0.10%. Finally, a financial economic analysis projected an annual savings of S/ 485 760 and a benefit-cost ratio of 2,84, demonstrating that the project was viable and highly profitable.

Evaluación y diseño de un sistema automatizado para mejorar la productividad en la etapa de dosificación de arroz

Priscila S. Mejía Uchofen, Industrial Engineer[1]; Robert S. Torres del Águila, Industrial Engineer [2]; Martha E. Tesen Arroyo; Master's Degree[3] Joselito Sánchez Pérez, Master's Degree[4]
[1,2,3,4]Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, priscilamejiauchofen@gmail.com, torresdelaguilarobert@gmail.com, , mtesen@usat.edu.pe, jsanchez@usat.edu.pe

Resumen– ***El propósito de esta investigación fue diseñar un sistema automatizado para mejorar la productividad en la etapa de dosificación de arroz en la empresa de estudio. El proceso manual presentaba tiempos de ciclo elevados, desperdicio de materia prima por sobrepeso y riesgos ergonómicos debido a la manipulación de cargas de 49 kg. Para abordar esta problemática, se inició con un diagnóstico mediante estudio de tiempos con cronometraje industrial, identificando que el tiempo de ciclo era de 24,46 s por saco, la productividad de 184 sacos/operario×día y un desperdicio del 1,24 % que generaba una pérdida anual de S/ 526 080. Posteriormente, se desarrolló el diseño de un sistema automatizado integrado por una tolva dosificadora con celdas de carga, compuertas neumáticas, faja transportadora y una cosedora automática, controlado mediante un PLC con un control ON/OFF en lazo cerrado. El diseño mecánico fue modelado en SolidWorks, el plano eléctrico se elaboró en AutoCAD, y la lógica de control fue programada y simulada en SoMachine, lo que permitió validar la secuencia lógica del programa de control. La propuesta de mejora proyectó reducir el tiempo de ciclo a 9,00 s por saco, incrementar la productividad a 400 sacos/operario×día, eliminar el levantamiento manual de cargas y disminuir el desperdicio al 0,10 %. Finalmente, se realizó un análisis económico financiero proyectó un ahorro anual de S/ 485 760, una relación beneficio-costo de 2,84, lo que evidenció que el proyecto fue viable y altamente rentable.***

Palabras clave- ***Automatización, dosificación, arroz, productividad, control ON/OFF, PLC.***

I. Introducción

El arroz es el cereal más consumido a nivel mundial y un pilar fundamental de la seguridad alimentaria en numerosos países. Según la Oficina de Análisis Global del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), la producción mundial de arroz pilado para la campaña 2024/2025 alcanzaría un récord de 532,7 millones de toneladas [1]. Este crecimiento ha impulsado la modernización de las etapas de procesamiento postcosecha, entre las cuales la dosificación ocupa un lugar central, ya que un control preciso del peso reduce las mermas por sobrellenado y garantiza la calidad del producto final.

En este contexto, el mercado global de máquinas para el envasado de arroz alcanzó un valor estimado de 3 123 millones de dólares en 2025, con una tasa de crecimiento anual proyectada del 8,2 % hasta 2033 [2]. Los sistemas automatizados de dosificación de última generación logran precisiones de ±0,2 % y velocidades superiores a 120 bolsas por minuto [3]; sin embargo, muchas industrias continúan registrando tasas de defectos de hasta 7,4 % en sus procesos manuales de dosificación [4], lo que evidencia una brecha tecnológica que afecta directamente su rentabilidad.

En Perú, la producción proyectada para la campaña 2024/2025 asciende a 2,6 millones de toneladas de arroz pilado [1], siendo Lambayeque uno de los principales departamentos productores de la costa, junto con Piura y La Libertad [5]. Pese a ello, muchas pequeñas y medianas agroindustrias de la región aún no han adoptado tecnologías de automatización. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) sostiene que la automatización en los sistemas agroalimentarios, lejos de generar desempleo, fortalece el sector productivo al eliminar las tareas más exhaustivas y generar empleo de mayor calidad [6].

A nivel local, la diferencia entre el proceso manual y automatizado resulta significativa, procesos de dosificación manual en Lambayeque registran rendimientos de apenas 5 bolsas por minuto, mientras que con sistemas automatizados se alcanzan hasta 33 bolsas por minuto [7]. Estudios en agroindustrias similares han reportado incrementos de productividad del 61,49 % al 91,04 % tras la implementación de sistemas de control automático [8], lo que evidencia el impacto directo de la automatización en la optimización de recursos y en la rentabilidad del proceso.

En la empresa de estudio ubicada en la región Lambayeque, dedicada al pilado de arroz, se identificó una problemática crítica en la etapa de dosificación. Esta se realiza de forma manual, cuatro operarios, en un turno de cinco horas, llenan, pesan, cosen y cargan sacos de 49 kg de manera continua. Esta carga supera el límite de 25 kg establecido por la normativa de seguridad y salud en el trabajo, específicamente la Resolución Ministerial N.° 375-2008-TR, emitida por el Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE) del Perú [9], representando un riesgo para la integridad física de los trabajadores. Además, el control del peso se realiza mediante la apertura manual de una compuerta sobre una balanza electrónica, lo que genera variaciones constantes que derivan en sobrellenado y mermas. Como resultado, la productividad de mano de obra actualmente es de 184 sacos/operario×día, evidenciando un uso ineficiente del recurso humano en relación con la capacidad instalada del molino.

Ante este escenario, la pregunta de investigación que orienta el presente trabajo es ¿En cuánto aumenta la

productividad de la etapa de dosificación al implementar un sistema automatizado? El objetivo general es diseñar un sistema automatizado para mejorar la productividad en la dosificación de arroz pilado. Los objetivos específicos son diagnosticar la situación actual de la etapa de dosificación, diseñar el sistema automatizado y evaluar el impacto económico y financiero de la propuesta.

El estudio se justifica desde el punto de vista práctico, la investigación proporciona a la empresa una base técnica para evaluar la automatización de su proceso de dosificación, con evidencia cuantificada de los beneficios esperados en productividad, reducción de tiempos de operación y eliminación de errores de pesaje. Desde el punto social, la propuesta busca eliminar la manipulación manual de cargas de 49 kg por parte de los operarios, reduciendo el riesgo de lesiones musculoesqueléticas y promoviendo condiciones de trabajo más seguras, en línea con la normativa vigente de seguridad y salud ocupacional.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Para el diagnóstico de la situación, en [10] se identificó que en una planta de molienda de arroz, el proceso de envasado requería 27 549,81 s por cada 100 kg, evidenciando que el envasado representaba el principal cuello de botella. Los autores emplearon estudios de tiempos mediante cronometraje, descomposición del proceso en elementos, pruebas de uniformidad con un nivel de confianza del 95 % y cálculo de tiempos estándar. Esta metodología es similar a la aplicada en la presente investigación, donde el proceso de ensacado también fue dividido en cinco elementos para determinar los tiempos normal y estándar. Por otro lado, en [11] se evaluó el proceso de ensacado, encontrando pérdidas de productividad entre el 24 % y el 39 % debido a paradas imprevistas. A partir de la estandarización del proceso, se logró reducir el tiempo de ciclo en más de cinco minutos por lote, demostrando la influencia de los tiempos improductivos sobre el desempeño de las operaciones de ensacado.

Para el diseño del sistema automatizado, en [12] se desarrolló un sistema de control para el ensacado de cacao basado en un PLC, celdas de carga y un mecanismo de compensación de sobrepeso durante el cierre de la compuerta. El sistema alcanzó una capacidad de cuatro sacos por minuto con un error de pesaje inferior al 1 %, evidenciando la efectividad del control automatizado en procesos agroindustriales. Por su parte, [13] diseñó una ensacadora semiautomática con dos etapas de dosificación, llenado grueso y fino, controladas mediante un PLC LOGO, obteniendo un error máximo de 33 g y una productividad de entre 3,5 y 5 sacos por minuto. Ambos estudios respaldan el empleo de PLC para controlar la dosificación y mejorar la precisión del pesaje.

En relación con la simulación y validación de la propuesta, el trabajo de [14] es especialmente relevante porque fue desarrollado en la región Lambayeque y utilizó las mismas herramientas consideradas en esta investigación: modelado en SolidWorks, programación en SoMachine y un PLC Schneider TM241CE40R. Los resultados mostraron una reducción del tiempo de secado de 12 a 8 horas, una disminución de los productos defectuosos del 29,7 % al 10 %, un ahorro anual de S/ 104 327 y una relación beneficio-costo de 1,13. Estos resultados evidencian la utilidad de integrar herramientas de simulación, análisis económico y automatización para sustentar técnicamente proyectos de mejora en procesos industriales.

De manera complementaria, [15] diseñaron un sistema automatizado en una empresa agroindustrial, empleando SolidWorks para el diseño mecánico y SoMachine para la simulación de la lógica de control con PLC. La propuesta redujo el tiempo de ciclo de 39 a 25 s por piña, proyectó una disminución de la tasa de rechazo de 65,15 % a 22,80 % y obtuvo un VAN de S/ 221 773,81 y una TIR de 40,35 %. Este antecedente respalda el uso de herramientas de simulación y control automático para validar propuestas de mejora antes de su implementación física, así como la evaluación económica mediante indicadores financieros.

Finalmente, para la evaluación económica, en [16] se implementó modelos financieros en hojas de cálculo para la toma de decisiones de inversión y concluyó que la evaluación de una inversión debe partir del cálculo de cuatro indicadores estandarizados: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Coeficiente Beneficio-Costo (CBC) y el Periodo de Recuperación (PR). El autor destaca que dichos indicadores permiten fundamentar la decisión de inversión con criterios técnicos y financieros objetivos. Este antecedente respalda la selección de los cuatro indicadores como base de la evaluación económica de la presente propuesta.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo evaluando indicadores numéricos como tiempos de ciclo, pesos y productividad [17]. El estudio fue de tipo aplicado orientado a resolver problemática presente y se desarrolló bajo diseño no experimental de corte transversal recopilando información en período determinado observando variables en condiciones reales sin intervenir ni modificar su comportamiento [17].

La unidad de análisis estuvo constituida por la etapa de dosificación de arroz en sacos de 49 kg considerando elementos observables y medibles como tiempos empleados en cada actividad, peso final de sacos, productividad y condiciones ergonómicas presentes en el área de trabajo. La población estuvo conformada por operaciones de dosificación realizadas en la planta agroindustrial. Se incluyeron cuatro operarios asignados a esta actividad, registros históricos de producción y ciclos de ensacado ejecutados durante dicho período.

Para la obtención de información se empleó muestreo no probabilístico por conveniencia seleccionando registros y observaciones que reflejaban comportamiento habitual de la operación permitiendo recopilar información confiable para el diagnóstico del sistema. La muestra conformada por cuatro operarios del área de dosificación, 20 ciclos completos de ensacado, 48 sacos pesados y registros de producción correspondientes a los 12 meses del año 2025 [17].

Para el diagnóstico de situación actual se inició con observación preliminar del proceso identificando y delimitando cinco elementos de trabajo claramente diferenciados siguiendo metodología de estudio de tiempos propuesta por [18]. Para el estudio de tiempos, se seleccionó al operario cuyo ritmo de trabajo era más representativo respecto al resto. Durante la observación, el cronometrador se ubicó a una distancia adecuada para evitar interrupciones o cambios en la forma habitual de trabajo del operario. Se empleó un cronómetro digital y se registraron 20 ciclos completos de la etapa, en cada ciclo se anotó el tiempo observado en segundos y la actividad observada que consistió en valoración subjetiva del ritmo de trabajo basada en concepto de Actividad Normal (An = 100) [18].

Una vez recopilados los tiempos se procedió a la validación estadística de muestra calculando el número mínimo de observaciones requeridas (N') para cada elemento considerando el nivel de confianza del 95% y precisión del ±5% verificando que 20 mediciones tomadas resultaron suficientes. Posteriormente, se aplicó el método analítico indirecto para determinar tiempos elementales normales representativos construyendo tablas de distribución de frecuencias para cada elemento y calculando el coeficiente de variación (C.V.) como indicador de homogeneidad con un valor de aceptación de C.V. < 6%. De esta manera, se determinó el tiempo estándar de cada elemento y, finalmente, el tiempo estándar total de la etapa de dosificación [18]. Además, se evaluó la variación del peso mediante el pesaje de 48 sacos con una balanza electrónica calibrada, registrando las diferencias respecto al peso nominal de 49 kg.

En la etapa de diseño, se definieron los requerimientos funcionales y no funcionales, estableciendo criterios relacionados con la precisión del pesaje, la seguridad de operación y la estrategia de control. Posteriormente, se seleccionaron los componentes del sistema incluyendo sensores, actuadores, motores y el controlador lógico programable, considerando criterios de compatibilidad, capacidad técnica, precisión y disponibilidad en el mercado [19].

El diseño se desarrolló mediante modelado tridimensional en SolidWorks. El dimensionamiento de los diferentes subsistemas se realizó con base en cálculos de ingeniería, utilizando la ecuación [20] para estimar el caudal másico del arroz, el modelo de [21] para el cálculo del espesor de las paredes de la tolva y el análisis de potencia para la selección del motor de la faja transportadora.

El sistema de control se diseñó definiendo la variable controlada, el tipo de lazo de control, la estrategia ON/OFF y la arquitectura de entradas y salidas del PLC. El plano eléctrico del sistema fue elaborado en AutoCAD. La programación se desarrolló en lenguaje Ladder (LD), de acuerdo con la norma IEC 61131-3, utilizando el entorno EcoStruxure Machine Expert (SoMachine)[22], [23].

Finalmente se efectuó análisis económico y financiero considerando costos iniciales de inversión frente a beneficios esperados como reducción de operarios, disminución de errores de pesaje, menor desperdicio de producto. Con indicadores financieros como Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Actual Neto (VAN) se evaluó rentabilidad del proyecto [24].

IV. RESULTADOS

En el diagnóstico se identificó que las principales limitaciones del proceso se concentraban en la etapa de dosificación de los sacos de arroz, donde el operario coloca el saco, abre la compuerta de la tolva, pesa manualmente con una balanza electrónica, cose el saco y lo carga para el traslado. Esta dependencia fue identificada como una de las principales causas de la baja productividad en la etapa evaluada.

Con el fin de determinar la productividad, se realizó un estudio de tiempos mediante cronometraje continuo. El análisis comprendió las cinco actividades que integraban el ciclo de trabajo: colocación del saco, llenado, ajuste del peso, costura y manipulación del saco terminado. Para cada operación, se registraron 20 observaciones, tomadas en condiciones normales de operación.

Los resultados indicaron que el número mínimo de observaciones necesarias para cada actividad se encontraba entre 1 y 3 registros, valor inferior a las 20 mediciones realizadas, confirmando que la muestra utilizada era suficiente para el análisis. Además, los errores de apreciación calculados se mantuvieron por debajo del límite crítico de ±5 %, evidenciando la confiabilidad de las mediciones y la consistencia de los tiempos obtenidos.

Los tiempos normales se calcularon aplicando valoración del ritmo de trabajo, y los suplementos se determinaron según la metodología de la OIT, considerando fatiga, postura, esfuerzo físico y condiciones ambientales. Los suplementos variaron entre 13% para elementos de baja exigencia física y 37% para los de mayor demanda ergonómica.

A partir de los tiempos estándar se determinó un tiempo de ciclo de 24,46 s/saco, siendo las actividades de ajuste del peso y carga del saco las que demandaban mayor esfuerzo por parte del operario.

TABLA I
TIEMPO ESTÁNDAR DE LA ETAPA DE DOSIFICACIÓN

Símbolo	Elemento	Tiempo estándar (s)
O1	Colocar saco	2,46
O2	Llenar saco	6,17
O3	Ajustar el peso del saco	4,80
O4	Cosido de saco	8,30
O5	Cargar saco	2,73
Tiempo de ciclo		24,46

Fuente: Elaboración propia

Con el tiempo de ciclo obtenido se calculó la capacidad de producción fue 147 sacos/h, mientras que la utilización de la capacidad instalada fue de 61,25 %. Asimismo, la productividad registrada fue de 184 sacos/operario×día, resultados que evidenciaron un bajo aprovechamiento de los recursos disponibles y justificaron la necesidad de implementar un sistema automatizado para optimizar la etapa de dosificación.

A esto se sumó la problemática ergonómica, los operarios levantaban sacos de 49 kg desde el suelo, superando el límite de 25 kg establecido por la Ley N.° 29088, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo de los Estibadores Terrestres y Transportistas Manuales del Perú [25]. Esta condición de riesgo incrementaba la fatiga y el riesgo de lesiones musculoesqueléticas, impactando directamente en la eficiencia operativa.

El tercer hallazgo fue el desperdicio de materia prima. Se registraron los pesos de 48 sacos producidos durante la etapa de ensacado. El análisis estadístico mostró que la totalidad de los sacos presentó peso superior al objetivo de 49 kg, con una media de 49,61 kg y una desviación estándar de 0,398 kg.

TABLA II
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DEL PESO DEL SACO DE ARROZ

Estadísticos peso del saco de arroz (kg)		
N	Válido	48
	Perdidos	0
Media		49,6115
Mediana		49,7000
Moda		50,00a
Desv. Desviación		,39843
Mínimo		48,95
Máximo		50,10
a. Existen múltiples modos. Se muestra el valor más pequeño.		

Fuente: Elaboración propia

En la Fig.1 se observa que la mayor concentración de los sacos se ubicó por encima del peso nominal de 49 kg, evidenciando una tendencia al sobrellenado durante el proceso de dosificación. Este comportamiento fue corroborado por el gráfico de control, en la Fig.2, en el cual los 48 puntos evaluados permanecieron dentro de los límites de control estadístico (UCL = 51,02 kg y LCL = 48,20 kg), lo que indicó que el proceso se mantuvo estable desde el punto de vista estadístico. Sin embargo, la media obtenida fue de 49,61 kg, superior al valor objetivo de 49 kg, evidenciando un desplazamiento sistemático del proceso hacia pesos mayores.

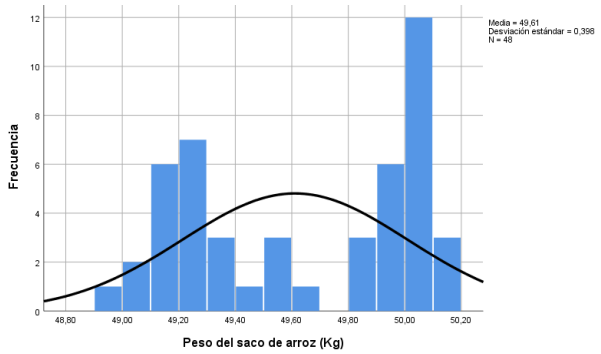


Fig. 1 Histograma del peso de los sacos

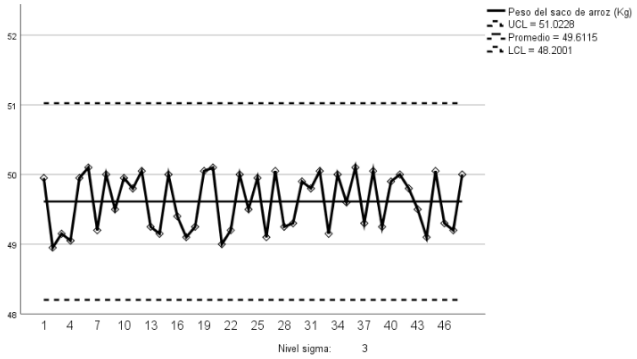


Fig. 2 Gráfico de control del proceso de dosificación

A partir del peso promedio obtenido se estimó un desperdicio de 1,24 % de materia prima, equivalente a 0.61 kg de arroz por cada saco producido. Considerando una producción promedio mensual de 21 971 sacos, equivalente a 274 sacos desperdiciados mensualmente de 49 kg. Desde el punto de vista económico, el desperdicio de materia prima representó una pérdida aproximada de S/ 43 840 mensuales, equivalente a S/ 526 080 anuales, consecuencia directa de la ausencia de un sistema automatizado de control de peso en la etapa de dosificación.

En base a los problemas identificados, la propuesta integra cuatro subsistemas que trabajan de manera coordinada y secuencial: el sistema de dosificación, compuesto por la tolva de almacenamiento y la tolva dosificadora gravimétrica; el sistema de transporte, conformado por una faja horizontal y una faja inclinada; el sistema de cosido, representado por una cosedora automática de avance continuo; y el sistema de control, basado en un PLC con lazo cerrado y acción ON/OFF.

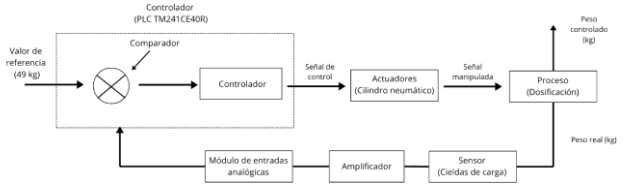


Fig. 3 Lazo de control cerrado del sistema de dosificación gravimétrica

El funcionamiento propuesto comienza al pulsar el botón verde de arranque; el PLC verifica que el dosificador esté vacío y activa la electroválvula Y1, abriendo la compuerta superior de la tolva de almacenamiento para que el arroz fluya por gravedad hacia el dosificador. Las celdas de carga, instaladas en la base del dosificador, monitorean continuamente el peso acumulado. Cuando la señal alcanza el valor de referencia de 49 kg, el PLC desactiva Y1, cerrando la compuerta y deteniendo el ingreso de producto. El sistema queda en espera de la señal del pulsador tipo pedal, que el operario acciona con el pie tras colocar el saco vacío bajo la salida del dosificador. Al recibir esta señal, el PLC activa la electroválvula Y2, abriendo la compuerta inferior para descargar los 49 kg de arroz dentro del saco; al completarse la descarga, la compuerta se cierra. El saco lleno es desplazado por una faja horizontal hacia la estación de

cosido; un sensor fotoeléctrico detecta su presencia y el PLC activa la cosedora automática, que sella la boca del saco mientras este avanza sin detenerse. Finalmente, una faja inclinada eleva el saco cosido hasta la altura del hombro del operario, quien lo retira para su almacenamiento. De forma simultánea, el PLC reinicia el ciclo, asegurando un flujo continuo.

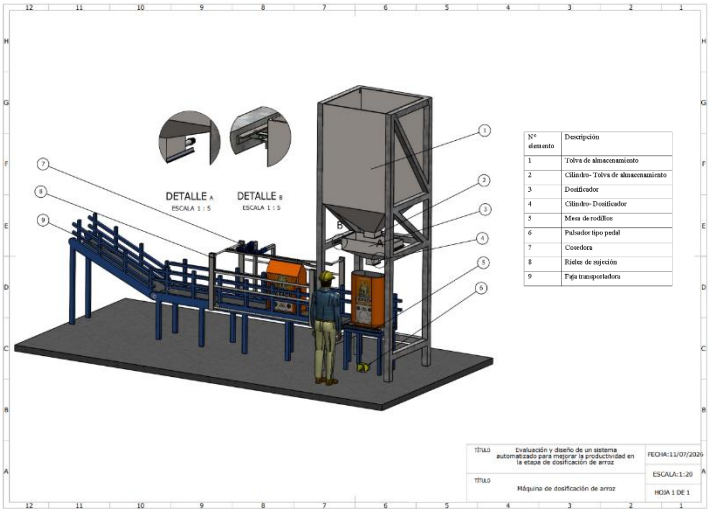


Fig. 4 Diseño CAD del sistema automatizado

Para el diseño de la tolva de almacenamiento se consideró una capacidad de 2 000 kg de arroz. Con densidad aparente de 850 kg/m³, el volumen requerido fue $V = 2000/850 = 2{,}35\ \text{m}^3$, incrementado a $V_{\text{diseño}} = 2{,}71\ \text{m}^3$ con un margen del 15 %. La tolva adoptó sección superior prismática de 1,20 m × 1,20 m y sección inferior piramidal truncada con salida de 0,20 m × 0,20 m, con ángulo de inclinación de 45°. La altura inferior resultó $h_{\text{inf}} = 0{,}50\ \text{m}$ y su volumen $V_{\text{inf}} = 0{,}29\ \text{m}^3$; el volumen superior fue $V_{\text{sup}} = 2{,}42\ \text{m}^3$, lo que dio una altura superior de $h_{\text{sup}} = 1{,}68\ \text{m}$.

Para garantizar la integridad estructural de la tolva, se analizaron las presiones laterales ejercidas por el arroz almacenado. La presión lateral máxima se determinó mediante el modelo de [20]:

$$P_{max} = \frac{\gamma \times D}{4 \times \tan \varphi} \tag{1}$$

Con $\gamma = 850\ \text{kg/m}^3$, $D = 1{,}20\ \text{m}$ y $\varphi = 30°$, se obtuvo $P_{\text{max}} = 447{,}37\ \text{kgf/m}^2$.

A la altura de la sección superior ($h = 1{,}70$ m), la presión lateral se calculó con:

$$P_z = P_{\text{max}} \left[1 - \left(\frac{h_{\text{sup}}}{A} + 1\right)^{-2}\right] \tag{2}$$

Donde $A = 1{,}45\ \text{m}$ es la abscisa característica, resultando $P_z = 353\ \text{kgf/m}^2$.

El espesor mínimo de pared se determinó con:

$$t = \frac{N \cdot P_z \cdot D}{2 \cdot S_y \cdot \eta} \tag{3}$$

Considerando acero AISI 304 ($S_y = 220$ MPa), factor de seguridad $N = 10$ y eficiencia de soldadura $\eta = 1{,}6$, se obtuvo $t = 0{,}059\ \text{mm}$. Por criterios de rigidez estructural y resistencia a la corrosión, se seleccionó un espesor comercial de 2 mm.

La tolva dosificadora, que contiene exactamente 49 kg de arroz antes de la descarga al saco, fue dimensionada con sección superior rectangular de 0,90 m × 0,45 m y salida cuadrada de 0,15 m × 0,15 m. Su volumen total es $V_{\text{dosificador}} = 0{,}0623\ \text{m}^3$, superior al volumen requerido de 0,0605 m³ correspondiente a 49 kg con un margen del 5 %.

Para la faja horizontal se consideró una velocidad de 12 m/min, sincronizada con la cosedora automática (20 cm/s). Con un ancho de banda de 450 mm, longitud de 2,0 m y diámetro de tambor de 142 mm, la potencia requerida se calculó con las siguientes formulas:

$$HP = \frac{ABP \times B \times RPM}{330} \tag{4}$$

$$ABP = BP \times SF \tag{5}$$

$$BP = (M + 2W) \times F_w \times M_p \times L + M \times H \tag{6}$$

La carga por acumulación de producto resultó Mp = 15,68 kg/m². La tracción total BP = 54,26 kg/m. Para garantizar un funcionamiento confiable y considerar posibles sobrecargas, se aplicó un factor de seguridad de 1,4, obteniéndose ABP = 75,96 kg/m, y una potencia requerida para la faja horizontal de 0,88 HP. Para la faja inclinada, con ángulo de 25°, longitud de 1,9 m, altura de elevación de 0,80 m y velocidad de 24 m/min, se obtuvo: Mp = 7,84 kg/m², BP = 73,25 kg/m. Aplicando el mismo factor de seguridad de 1,4 se obtuvo ABP = 102,55 kg/m, y una potencia requerida de 7,35 HP. Se seleccionaron motores comerciales de 1 HP (0,75 kW) para la faja horizontal y 7,5 HP (5,5 kW) para la faja inclinada. Las compuertas superior e inferior son accionadas por cilindros neumáticos de doble efecto de 32 mm de diámetro y 100 mm de carrera.

El plano eléctrico se organizó en tres secciones: circuito de fuerza, control y pesaje. En el circuito de fuerza se incluyeron dos circuitos trifásicos: el primero para el motor de la faja transportadora (M1, 10 HP), protegido por Q1, G1 y RT1, y accionado por K1 y el variador ATV312H037N4; el segundo para la cosedora (M2), protegido por Q2, G2 y RT2, y accionado por K2. El interruptor Q3 protege el circuito monofásico de la fuente de 24 V DC. En el circuito de control, el PLC TM241CE40R recibe las señales de los pulsadores de parada (I0), arranque (I1), emergencia (I2), pedal de descarga (I3) y sensor de proximidad (I4); sus salidas gobiernan los pilotos, las electroválvulas Y1 e Y2, y los contactores K1 y K2. La señal analógica de 4–20 mA del amplificador RW-ST01A ingresa al módulo TMC4AI2.

El control del sistema recae en un PLC Schneider Electric TM241CE40R, que recibe la señal de peso a través de un módulo analógico TMC4AI2. Este módulo adquiere la señal de 4–20 mA proveniente del amplificador transmisor RW-ST01A, el cual combina las lecturas de cuatro celdas de carga de 20 kg cada una.

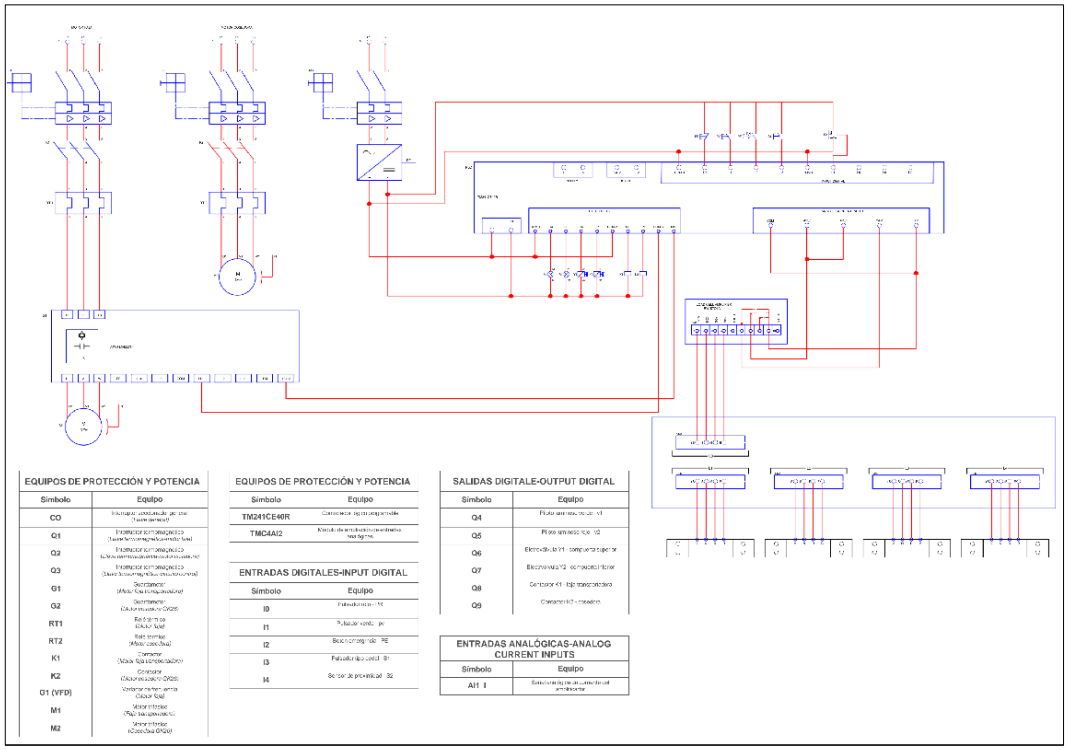
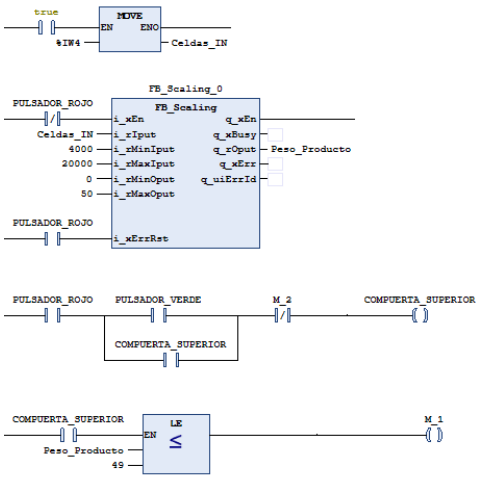


Fig. 5 Plano eléctrico

La lógica de control fue programada en lenguaje Ladder dentro del entorno SoMachine y validada mediante simulación lógica del programa. El ciclo simulado comienza con la lectura de la señal analógica y su conversión a kilogramos (Redes 1–2). Al pulsar el botón de arranque, se abre la compuerta superior (Red 3), y el sistema verifica que el peso no supere los 49 kg para mantener el llenado (Red 4). Cuando se alcanza el peso objetivo, se activa un temporizador de estabilización de 2 s (Redes 5–6). Luego, la descarga se habilita mediante un pedal y un temporizador de 6 s para el vaciado completo (Redes 7–8). Finalizada la descarga, se cierra la compuerta inferior y se activa un reinicio de 2 s (Redes 9–10). De forma paralela, se controlan la faja transportadora y la cosedora, la cual se activa con un sensor óptico y un temporizador de 4 s para el cosido (Redes 11–13).



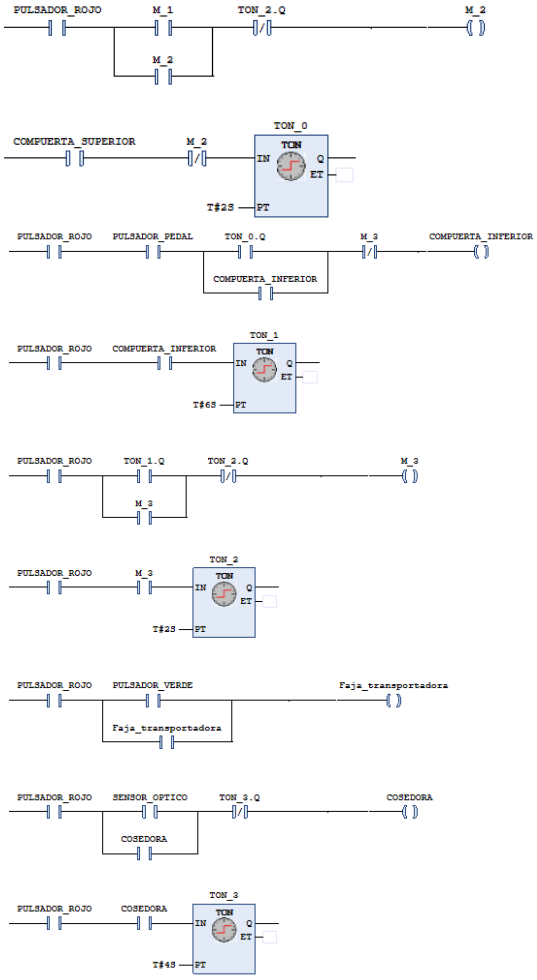


Fig. 6 Lógica en Somachine

Para determinar el tiempo de llenado del dosificador y la descarga al saco, se calculó el caudal másico del arroz a través de las aberturas utilizando la ecuación de [21] para flujo de sólidos granulares:

$$\dot{m} = C \times \rho \times \sqrt{g} \times (b - k)^{2,5}$$

Donde:

- C = coeficiente de descarga (0,58 para arroz)
- ρ = densidad aparente del arroz (850 kg/m³)
- g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
- b = ancho de la abertura (0,30 m para tolva de almacenamiento)
- k = coeficiente de forma (0,02 m)

Para la descarga desde la tolva de almacenamiento hacia el dosificador:

$$\dot{m}_{\text{tolva}} = 0{,}58 \times 850 \times \sqrt{9{,}81} \times (0{,}30 - 0{,}02)^{2.5} = 64{,}06 \text{ kg/s} \quad (7)$$

El tiempo base para alcanzar 49 kg es 0,765 s, por seguridad y considerando la variabilidad del flujo de materiales granulares, se estableció un tiempo de 3 s para la operación O1.

Para la descarga desde el dosificador hacia el saco, con abertura de 0,15 m:

$$\dot{m}_{\text{dosificador}} = 0{,}58 \times 850 \times \sqrt{9{,}81} \times (0{,}15 - 0{,}02)^{2.5} = 9{,}41 \text{ kg/s}$$

El tiempo base de descarga es: $5{,}21$ s, se estableció un tiempo de 6 s para la operación O3 considerando un margen de seguridad.

El tiempo de ciclo del sistema automatizado se establece en 9,00 s por saco, determinado por la operación de llenado, el llenado del dosificador con un tiempo de 3,00 s más descarga al saco con 6,00 s, mientras que las operaciones posteriores, la operación de cosido con 4,00 s; elevación con 5,00 s y evacuación con 2,00 s se ejecutan en paralelo sobre distintos sacos.

En la Fig. 7 se muestra la simulación del gráfico de control del proceso de pesaje para el sistema automatizado propuesto. Los 50 puntos simulados se ubican dentro de los límites de control (LCS = 49,104 kg y LCI = 48,9064 kg), lo que indica estabilidad del proceso en la simulación. El rango de variación simulado está entre 48,95 kg y 49,10 kg, lo que permitiría mantener el peso dentro de la tolerancia de ±0,05 kg respecto al valor objetivo de 49 kg. Este nivel de precisión es similar al reportado en otros estudios [13], donde se consiguieron errores de pesaje por debajo de 50 g utilizando sistemas de control con PLC y celdas de carga. La reducción de la variabilidad y el centrado en el valor objetivo contribuirían a reducir el desperdicio de materia prima y a mejorar la exactitud del pesaje.

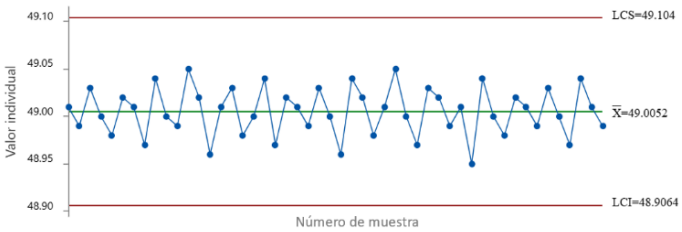


Fig. 7 Gráfico de control simulado del proceso de dosificación automatizada propuesto

Con base en los cálculos de ingeniería y la simulación del sistema en SoMachine, se proyectaron los nuevos indicadores de desempeño. En la Tabla III se comparan los valores actuales con los proyectados. Se observa una reducción del tiempo de ciclo del 63,27 %, de 24,46 s a 9,00 s por saco; un incremento de la productividad de mano de obra del 117,39 %, de 184 a 400 sacos/operario×día y una disminución del desperdicio de materia prima del 91,94 %, del 1,24 % al 0,10 %. La productividad de la mano de obra del sistema propuesto se determinó en función de la capacidad diseñada de la planta. Considerando 5 horas efectivas de ensacado por día y el tiempo de ciclo mencionado, la capacidad teórica alcanza 2 000 sacos/día; sin embargo, la capacidad diseñada limita la producción a 1 200 sacos/día. Con tres operarios, la productividad proyectada es de 400 sacos/operario×día. Este valor corresponde a una proyección y se sustenta en la reducción del tiempo de ciclo, la estandarización del proceso y la disminución del personal requerido. Estos cambios son consistentes con los reportados en [12], [14], valores proyectados a partir del diseño y la simulación, las mejoras se sustentan en la automatización del proceso.

TABLA III
COMPARACIÓN DE INDICADORES

Indicador	Actual	Proyectado	Variación
Tiempo de ciclo (s/saco)	24,46	9,00	−63,27 %
Productividad MO (sacos/op×día)	184	400	+117,39 %
Utilización de capacidad	61,25 %	100 %	+63,27 %
Desperdicio de materia prima	1,24 %	0,10 %	−91,94 %
Peso levantado desde suelo (kg)	49	0	−100 %

Fuente: Elaboración propia

Para alcanzar el tercer objetivo, se realizó la evaluación económica de la propuesta de automatización con un horizonte de 3 años. La inversión total asciende a S/ 28 217,21, distribuida entre activos tangibles e intangibles. El financiamiento se plantea al 100 % mediante un préstamo a 5 años con TEA del 15 % y cuotas fijas anuales de S/ 8 417,63.

TABLA IV
INVERSIÓN Y FINANCIAMIENTO

Concepto	Monto (S/)
Inversión tangible	S/ 20 978,00
Inversión intangible	S/ 7 239,21
Total inversión	S/ 28 217,21
Préstamo (TEA 15 %, 5 años)	S/ 28 217,21
Cuota anual fija	S/ 8 417,63

Fuente: Elaboración propia

Los ingresos anuales generados por la mejora provienen del incremento de producción, 465 sacos/día, equivalente a S/ 78 120,00 anuales y de la reducción del desperdicio de materia prima del 1,24 % al 0,10 %, generando S/ 10 186,85 anuales, totalizando S/ 88 306,85 al año. Los egresos anuales consideran energía eléctrica, mantenimiento, mano de obra adicional, gastos financieros y depreciación.

TABLA V
FLUJO DE CAJA

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Inversión	S/ 28 217,21			
Ingresos		S/ 88 306,85	S/ 88 306,85	S/ 88 306,85
Egresos		S/ 67 075,70	S/ 50 823,94	S/ 50 102,02
Utilidad		S/ 21 231,14	S/ 37 482,90	S/ 38 204,82
Depreciación		S/ 2 411,72	S/ 2 411,72	S/ 2 411,72
Amortización	S/28 217,21	S/4 185,05	S/4 812,81	S/5 534,73
FNE	-S/ 28 217,21	S/ 19 457,82	S/ 35 081, 82	S/ 35 081,82

Fuente: Elaboración propia

Con una tasa de descuento del 15 %, el Valor Actual Neto (VAN) resultó en S/ 51 882,47, la Tasa Interna de Retorno (TIR) alcanzó el 111,11 %, la relación beneficio-costo (B/C) fue de 2,84 y el período de recuperación (PRI) fue de 1,06 años. Evidenciando que la implementación del sistema automatizado es económicamente viable y altamente rentable.

V. DISCUSIONES

El diagnóstico evidenció un tiempo de ciclo de 24,46 s/saco. Para comparar con [10], que reportó 27 549,81 s por cada 100 kg, se homogeneizó la unidad: 27 549,81 s / 100 kg = 275,50 s/kg. Nuestro resultado, en la misma unidad, fue 24,46 s / 49 kg = 0,50 s/kg. La diferencia es muy superior en [10], lo que se explica porque aquel estudio incluía etapas adicionales como clasificación manual del grano y una estación de trabajo desorganizada, mientras que aquí solo se evaluaron cinco elementos. La descomposición en elementos y el cronometraje con nivel de confianza del 95 % aplicado en ambos estudios validan la consistencia metodológica, y ambos coinciden en señalar la dosificación manual como el principal cuello de botella.

Respecto a las pérdidas de productividad, [11] reportó pérdidas entre 24% y 39% por paradas imprevistas. Nuestro diagnóstico determinó una utilización de capacidad de 61,25%, equivalente a una brecha de 38,75%, lo que respalda la necesidad de intervenir el proceso manual.

El diseño propuesto proyectó un tiempo de ciclo de 9,00 s/saco. En misma unidad: 9,00 / 49 = 0,18 s/kg. En [12], la mejora se logró mediante automatización con PLC y HMI, celdas de carga y un mecanismo de compensación de sobrepeso durante el cierre de la compuerta. Ese sistema alcanzó 4 sacos/minuto (0,30 s/kg). La comparación 0,18 s/kg vs 0,30 s/kg muestra que nuestro diseño es más rápido por kilogramo, lo que se explica por la menor fluidez y mayor densidad aparente del arroz pilado frente al cacao. Lo relevante es que en ambos casos la reducción del tiempo se logra por la automatización del control de dosificación, no por un simple ajuste manual.

En precisión, [13] diseñó una ensacadora semiautomática con dos etapas de dosificación (llenado grueso y fino) controladas por PLC, logrando un error máximo de 33 g (0,033 kg), equivalente a 0,07% en un saco de 49 kg. Nuestro proyectado es un desperdicio de 0,10% = 0,049 kg/saco. En misma unidad: 0,033 kg vs 0,049 kg, o 0,07% vs 0,10%. Asimismo, [12] reportó un error inferior al 1%, superior a nuestro 0,10%. Ambos antecedentes validan la eficacia del control gravimétrico en lazo cerrado con PLC y celdas de carga.

. En cuanto a simulación y validación, [14] utilizó SolidWorks y SoMachine, con un PLC Schneider TM241CE40R, y redujo el tiempo de secado de 12 a 8 horas y los productos defectuosos de 29,7% a 10%. De manera complementaria, [15] empleó SolidWorks y SoMachine con PLC en una empresa agroindustrial, y redujo el tiempo de ciclo de 39 a 25 s por piña, además de disminuir la tasa de rechazo de 65,15% a 22,80%. Ambos estudios confirman que la automatización con PLC y la simulación previa permiten validar la lógica de control y estandarizar el proceso antes de su implementación física, y demuestran que la automatización permite estandarizar el proceso y eliminar la variabilidad a la operación manual.

En términos económicos, la propuesta alcanzó una relación beneficio-costo de 2,84, superando ampliamente el umbral de rentabilidad. Este indicador resulta favorable en comparación con el estudio de [14], que obtuvo un beneficio-costo de 1,13 en su propuesta de control de temperatura para secado de fideos. La diferencia se explica por el ahorro generado por la eliminación del desperdicio de materia prima y la reducción de un operario en la línea de producción. Asimismo, los resultados confirman lo planteado por [16], quien señala que la evaluación de una inversión debe partir del cálculo de cuatro indicadores estandarizados, VAN, TIR, CBC y PR. En el presente proyecto, el VAN positivo de S/ 51 882,47, la TIR del 111,11 % y el período de recuperación de 1,06 años respaldan la viabilidad económica de la automatización, demostrando que la inversión se recupera en un plazo muy corto.

VI. CONCLUSIONES

La investigación cumplió el objetivo general de incrementar la productividad en la etapa de dosificación de arroz mediante el diseño un sistema automatizado.

El diagnóstico de la situación inicial evidenció que el proceso manual operaba con una productividad de 184 sacos/operario×día y una utilización de la capacidad instalada del 61,25 %. Asimismo, se determinó un desperdicio de materia prima del 1,24 %, equivalente a una pérdida anual de S/ 526 080, y se identificó que los operarios manipulaban manualmente cargas de 49 kg, valor que excede el límite establecido por la normativa vigente.

El diseño del sistema automatizado proyectó reducir el tiempo de ciclo en un 63,27 %, con lo que la productividad de mano de obra se incrementaría de 184 a 400 sacos/operario·día, se eliminaría la manipulación manual de cargas y el desperdicio de materia prima se reduciría del 1,24 % al 0,10 %.

Finalmente, el análisis económico-financiero confirmó la viabilidad del proyecto, con un Valor Actual Neto (VAN) de S/ 51 882,47, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 111,11 %, una relación beneficio-costo de 2,84 y un período de recuperación de la inversión de 1,06 años, lo que evidencia una elevada rentabilidad.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo por el respaldo académico y los recursos formativos brindados durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se agradece a la empresa del estudio por facilitar el acceso a la información y las instalaciones, lo que permitió desarrollar una propuesta con aplicación real en la industria agroalimentaria.

REFERENCIAS

[1] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, «Observatorio de Commodities Arroz N.° 01-2025», 2025, Accedido: 29 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.midagri.gob.pe:80/jspui/handle/20.500.13036/1984

[2] «Rice Packaging Machines Soars to 3123.3 million , witnessing a CAGR of 8.2 during the forecast period 2026-2033». Accedido: 25 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.archivemarketresearch.com/reports/rice-packaging-machines-446830

[3] SIMAG, «Dosificadores-SIMAG INDUSTRIAL PERÚ S.A.C». Accedido: 25 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.simagindustrialperu.com/maquinas-dosificadores/dosificadores-de-liquidos-viscosos-polvos-granulados-granos-peru.html

[4] E. Moreno, «Diseño de una máquina empacadora, dosificadora y selladora de fundas para arroz», QUITO/ EPN/ 2010, 2010. Accedido: 31 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1287

[5] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, «Gobierno destaca al arroz como una de las principales cadenas productivas del país». Accedido: 25 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/1257651-gobierno-destaca-al-arroz-como-una-de-las-principales-cadenas-productivas-del-pais

[6] FAO, «The State of Food and Agriculture 2022». Accedido: 29 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://openknowledge.fao.org/items/98a4c80a-b4d3-403c-8557-d8536c8316ee

[7] W. Flores y M. Reyes, «Sistema de control para automatizar una máquina embolsadora de arroz de 1kg en la empresa Comolsa - Lambayeque», *Univ. Nac. Pedro Ruiz Gallo*, oct. 2024, Accedido: 29 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/13873

[8] L. Chancafe, «Propuesta de diseño de un sistema automatizado en el Área de Pre Limpieza de arroz para incrementar la productividad en la empresa Molinerías Grupo RAM S.A.C.», 2019. Accedido: 21 de septiembre de 2026. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.usat.edu.pe/items/f15f0014-4185-4fcb-95c5-1515e8e6a133

[9] «Resolución Ministerial N.° 375-2008-TR». Accedido: 27 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.pe/institucion/mtpe/normas-legales/394457-375-2008-tr

[10] D. Novitasari, M. Aprilina, A. Maksum, A. Ritonga, y S. Situmorang, «Time Study Analysis on Rice Milling Process at Rice Milling Unit (RMU) "Teaching Industry" Unsoed», *J. Keteknikan Pertan.*, vol. 13, pp. 211-226, jun. 2025, doi: 10.19028/jtep.013.2.211-226.

[11] A. Muñoz, «Estudio de tiempos y su relación con la productividad», 2021, doi: http://doi.org/10.33996/revistaenfoques.v5i17.104.

[12] D. Atiencia, E. Uriarte, y A. Cordovés, «Diseño del sistema de control, para una máquina ensacadora-pesadora semiautomática de cacao», *Rev. Tse'de*, vol. 7, n.º 2, dic. 2024, doi: 10.60100/tsede.v7i2.233.

[13] J. Orna, D. Mayorga, E. Viteri, I. Armas, y G. Haro, «Diseño y construcción de una ensacadora semiautomática con una tolerancia mínima de Error ± 50gr en el Rango de 25kg a 50kg», *Polo Conoc.*, vol. 10, n.º 7, pp. 2440-2484, jul. 2025, doi: 10.23857/pc.v10i7.10030.

[14] E. Uchofen, J. Sánchez, y M. Arroyo, «Design of a temperature control system to increase profits in the noodle drying process», en *Proc. LACCEI int. multi-conf. eng. educ. technol.*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LEIRD2025.1.1.310.

[15] D. Flores, K. Castillo, M. Laos, E. Barboza, J. Sánchez, y M. Arroyo, «Evaluation and design of an automated system to increase productivity in the pineapple peeling and cutting process», 2026, doi: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2026.1.1.1097.

[16] M. Nizama, «Implementación de modelos financieros en hojas de cálculo para la toma de decisiones de inversión», *Aypate ISSN 2961-2160 ISSN-E 3028-9432 Vol 2 Nº 2 2023 Ejemplar Dedic. Abril - Junio Págs 1-10*, n.º 2, 2023, doi: https://doi.org/10.57063/ricay.v2i2.38.

[17] R. Hernández, C. Fernández, y P. Baptista, *Metodología de la investigación*. McGraw Hill España, 2014. Accedido: 26 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008

[18] L. Palacios, «Ingeniería de métodos: movimientos y tiempos». Accedido: 26 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://descubridor.banrepcultural.org/discovery/fulldisplay/alma991016986206107486/57BDLRDC_INST:57BDLRDC_INST

[19] F. Lujan Soto, «Metodología para el diseño e integración de máquinas automatizadas.», may 2022, Accedido: 9 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.11961/6483

[20] M. Reimbert y A. Reimbert, «Construcción de silos : teoría y práctica - Universidad Córdoba». Accedido: 9 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://mezquita.uco.es/permalink/34CBUA_UCO/1t6323e/alma991000912189704992

[21] W. A. Beverloo, H. A. Leniger, y J. van de Velde, «The flow of granular solids through orifices», *Chem. Eng. Sci.*, vol. 15, n.º 3, pp. 260-269, sep. 1961, doi: 10.1016/0009-2509(61)85030-6.

[22] «EcoStruxure Machine Expert | Schneider Electric Perú», Schneider Electric. Accedido: 9 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.se.com/pe/es/product-range/2226-ecostruxure-machine-expert/

[23] «PLC Programming: Overview of IEC 61131-3 in Industrial Automation Systems - Technical Articles». Accedido: 9 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://control.com/technical-articles/an-overview-of-iec-61131-3-Industrial-Automation-Systems/

[24] P. I. Vidal-Carreras, «Valor actual neto (VAN): cómo tomar decisiones de inversión», jun. 2025, Accedido: 9 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://riunet.upv.es/handle/10251/221751

[25] *Ley N.° 29088, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo de los Estibadores Terrestres y Transportistas Manuales*. 2007. [En línea]. Disponible en: https://www.saludarequipa.gob.pe/desa/archivos/Normas_Legales/LEY%2029088%20LEY%20DE%20SEGURIDAD%20Y%20SALUD%20EN%20EL%20TRABAJO%20DE%20LOS%20ESTIBADORES%20TERRESTRES.pdf