Reduction of Urgent Purchases in a Metalworking MSME MTO via Discrete Event Simulation and (R, s, S) Policy

José Jesús Alejandro Soria Vásquez[1]; Maximiliano Rodolfo Arroyo Ulloa[2]; Diana Peche Cieza[3]
[1,2,3]Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo (USAT), Chiclayo, Peru, 72624280@usat.pe, marroyo@usat.pe, dpeche@usat.pe

Abstract– ***The purpose of this research was to propose an inventory management improvement to reduce urgent purchases in a metalworking MSME operating under a Make-to-Order (MTO) model with high stochastic demand uncertainty. The initial diagnosis revealed a high reliance on urgent purchases for critical raw materials (aluminum profiles), which account for 62.24% of transactions (122 events) and an extra cost of S/ 2,223.53 (21.87% surcharge), reducing the company's On-Time In Full (OTIF) service level to 77%. Additionally, the company lacks a formal Kardex and replenishment policies, operating reactively. To address this problem, a cloud-based digital Kardex was developed to ensure Inventory Record Accuracy (IRA), and a stochastic periodic review policy (R, s, S) was formulated, whose parameters were calculated analytically following Ballou's formulation for Class A items, with the AS-IS model validated in Rockwell Arena across 30 replicates (simulated OTIF 74.3% vs. real 77%). Finally, the cost-benefit analysis projected an improvement by reducing the frequency of urgent purchases to 7.1% (10.3 annual events), projecting the eradication of delay penalties (from S/ 104,026.25 to S/ 0.00) and raising simulated OTIF to 100% through local contingency supply. Likewise, the total logistics operating cost is projected to decrease by 90.9%, generating savings of over S/ 118,000 annually. The simulation-based economic evaluation over a 5-year horizon at a 16.59% discount rate (COK) projected an NPV of S/ 296,640, an IRR of 1,417% (driven by avoided delay penalties), a payback period of 0.11 years, and a B/C ratio of 11.76, confirming the viability of the proposal.***

Keywords-- ***Inventory Management, Urgent Purchases, Make to Order (MTO), Discrete Event Simulation, (R, s, S) Policy.***

Reducción de compras urgentes en una MYPE metalmecánica MTO mediante simulación de eventos discretos y política (R, s, S)

José Jesús Alejandro Soria Vásquez[1]; Maximiliano Rodolfo Arroyo Ulloa, Doctor[2];Diana Peche Cieza, Magister[3]
[1,2,3]Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo (USAT), Chiclayo, Perú, 72624280@usat.pe, marroyo@usat.pe, dpeche@usat.pe

Resumen*– El propósito de esta investigación fue proponer una mejora en la gestión de inventarios para reducir las compras urgentes en una MYPE metalmecánica que opera bajo el modelo de fabricación bajo pedido (Make to Order, MTO). El diagnóstico inicial reveló una alta dependencia de compras urgentes para los insumos críticos (perfiles de aluminio), las cuales representan el 62,24 % de las transacciones (122 eventos) y un sobrecosto de S/ 2 223,53, mermando el Nivel de Servicio (OTIF) de la empresa al 77 %. Adicionalmente, la empresa carecía de Kardex formal y de políticas de reabastecimiento, operando reactivamente. Para abordar esta problemática, se desarrolló un Kardex digital para garantizar la Exactitud de Registro de Inventario (ERI) y se formuló una política estocástica de revisión periódica (R, s, S) cuyos parámetros se calcularon analíticamente siguiendo la formulación de Ballou, validándose el modelo AS-IS en Rockwell Arena mediante 30 réplicas (OTIF simulado 74,3 % vs. real 77 %). Finalmente, el análisis costo-beneficio proyectó una mejora reduciendo las compras urgentes a 10,3 eventos anuales (7,1 %), erradicando las penalidades por retraso y elevando el OTIF simulado al 100 % mediante compras de contingencia local. Asimismo, el costo logístico total de operación disminuiría en un 90,9 %, generando un ahorro superior a S/ 118 000 anuales. La evaluación económica basada en simulación proyectó un VAN de S/ 296 640, una TIR de 1 417 % (por penalidades contractuales evitadas), un PRI de 0,11 años y un B/C de 11,76, confirmando la viabilidad de la propuesta.

Palabras clave*-- Gestión de inventarios, Compras urgentes, Make to Order (MTO), Simulación de Eventos Discretos, Política (R, s, S).

I. Introducción

Uno de los desafíos más grandes de las empresas bajo el modelo de fabricación bajo pedido (Make to Order, MTO) es cumplir con la entrega de productos a tiempo. Un mal control de inventarios puede generar falta de material, obligando a recurrir a compras urgentes que generan sobrecostos y disminuyen la utilidad [1]. A nivel global, en 2024 el 90 % de líderes del sector enfrentaron problemas graves en sus cadenas [2], generando quiebres de stock donde las empresas tardan un promedio de dos semanas en responder. La acumulación en masa de inventarios ha quedado obsoleta: el uso de colchones de seguridad cayó del 59 % al 34 %, mientras dos tercios de las empresas implementan sistemas APS y el 73 % persigue estrategias de doble fuente [2]; sin embargo, el 33 % implementa estas soluciones sin comprobar su factibilidad, demostrando la importancia de validar económicamente cualquier modelo antes de su ejecución.

En el Perú, la ineficiencia en la gestión de materiales es un problema económico importante. En las microempresas, el costo logístico representa el 21,1 % de sus ventas; dentro de este costo, transporte y distribución aportan 26,4 %, compras y gestión de proveedores 24,3 %, y almacenamiento 16,8 % [3]. La madurez tecnológica fue baja solo el 10,7 % de microempresas ha definido indicadores logísticos formales [3]; como consecuencia, el OTIF en microempresas apenas alcanza el 64,5 %.

La presente investigación se centra en una MYPE metalmecánica en Chiclayo que opera bajo un modelo MTO con demanda estocástica de alta incertidumbre, sin gestión formal de inventario ni Kardex transaccional. En 2025, registró 122 compras urgentes (62,24 % del total), con un costo de S/ 12 387,99 y un sobrecosto de S/ 2 223,53. De acuerdo con la problemática descrita, se plantea: ¿de qué manera una propuesta de mejora en la gestión de inventarios reduce los costos por compras urgentes en la empresa?

Para responder a esta interrogante, el objetivo general es proponer una mejora en la gestión de inventarios para reducir las compras urgentes en la MYPE mencionada. Los objetivos específicos son: diagnosticar la situación actual de la gestión de inventarios y el proceso de compras asociado; elaborar el diseño de una propuesta de mejora orientada a reducir las compras urgentes; y valorar el impacto económico de la propuesta mediante una evaluación económica.

La viabilidad del estudio se justifica por la alta incertidumbre del modelo MTO y la falta de registros, factores que impiden el uso de modelos analíticos tradicionales. Como alternativa, se propone el diseño de una política (R, s, S) mediante simulación de eventos discretos, metodología validada por [4] y [5] en cadenas con incertidumbre, y definida en [6] como herramienta para modelar sistemas dinámicos. Se espera que esta metodología genere reducciones de costos entre el 22 % y el 66 % según la evidencia teórica reportada en [7].

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Para el primer objetivo, el estudio de [8] aplicó ABC multicriterio con AHP en un taller metalmecánico en Perú, demostrando que los artículos Clase A absorben el 74 % del impacto operativo y que el desorden físico es la causa raíz de la ineficiencia. En [9], mediante DEA sobre 18 órdenes en una empresa de piezas metálicas, se demostró que las órdenes R&D alcanzaron 87,2 % de eficiencia frente al 96,9 % de las órdenes de producción en masa. Asimismo, la investigación de [10] aplicó EOQ en una microempresa metalmecánica con demanda intermitente, identificando que la falta de políticas formales genera quiebres recurrentes.

Para el segundo objetivo, el estudio de [11] comparó los modelos (Q, R) y (s, S) mediante Monte Carlo en una MYPE, demostrando la superioridad de (s, S) para artículos críticos. En [12] se implementó Min-Max en suministro de acero con simulación, reduciendo el inventario 55,31 % y los viajes 10,28 %. El estudio de [13] demostró que los modelos híbridos MTS-MTO con revisión periódica superan a los tradicionales, reduciendo el WIP hasta 50 %. La investigación de [14] integró Lean Warehousing y DDMRP en una MYPE, eliminando quiebres e incrementando la rotación 64,8 %, validando que estructurar el almacén es indispensable antes de simular políticas estocásticas.

Para el tercer objetivo, el estudio de [1] desarrolló un modelo de stock de seguridad validado en 96 escenarios. En [7] se demostraron reducciones de costo entre 22 % y 66 % mediante optimización vía simulación. El estudio de [15] demostró mediante simulación Monte Carlo que un modelo EOQ adaptativo con Partial Backordering supera al EOQ clásico determinístico bajo demanda incierta. El estudio de [16] corroboró que la simulación de eventos discretos permite calcular parámetros de política de inventario bajo demanda estocástica. Sin embargo, la literatura no aborda el acoplamiento entre un control lógico estricto (Kardex digital inmutable) y la simulación de eventos discretos en una MYPE metalmecánica MTO real, brecha que el presente estudio cubre.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo-correlacional y diseño transaccional. La unidad de análisis fue una MYPE metalmecánica MTO en Chiclayo, considerando sus procesos de gestión de inventarios, los ítems de inventario (perfiles, cristales, accesorios), los pedidos de clientes y los documentos internos. La población conformada por el total de registros de pedidos generados durante 2025 se analizó mediante muestra censal; para el diseño de la simulación, se aplicó muestreo no probabilístico por juicio seleccionando los ítems Clase A por su mayor impacto en la problemática. Los datos primarios se obtuvieron de registros de compras, facturas y órdenes de trabajo; los secundarios, de artículos científicos y normativa SUNAT.

Para el primer objetivo, se caracterizó la empresa mediante observación directa y revisión documental de los 196 registros de compras, facturas y órdenes de producción del año 2025. Operacionalmente, se tipificó como «compra urgente» a toda adquisición fuera del ciclo regular con Lima (lead time de 3 días) para atender quiebres inmediatos mediante proveedores locales (lead time = 0) con 21,87 % de sobrecosto, identificándose 122 eventos (62,24 % de las transacciones). Se ejecutó una clasificación ABC por valor de consumo, siguiendo la metodología multicriterio [8] y los principios de gestión de inventarios [17], evidenciando que la discrepancia entre el mayor consumo y las compras urgentes radicaba en componentes específicos que actuaban como cuellos de botella en taller. La frecuencia y sobrecosto se cuantificaron conforme a los modelos de rush deliveries de [1] y el análisis de eficiencia MTO de [9]. El Nivel de Servicio se midió contrastando fechas reales frente a prometidas y pedidos completos (OTIF binario). Las causas raíz se consolidaron mediante Diagrama de Ishikawa y se priorizaron con Matriz de Vester.

Para el segundo objetivo, se desarrolló un Kardex digital sobre arquitectura cloud (Vercel y Supabase con PostgreSQL), con nomenclatura SKU universal estructurada bajo la sintaxis [id_material]-[id_plantilla]-[id_acabado]-[id_marca] y un Modelo Entidad-Relación que centraliza las variantes en la tabla cat_productos_variantes, homologando cuatro proveedores comerciales para proteger la trazabilidad histórica. El sistema se rige por funciones automatizadas (Triggers) que actualizan parámetros comerciales en tiempo real y operan bajo una estricta política de inmutabilidad que exige ajustes compensatorios explícitos, garantizando la Exactitud de Registro de Inventario (ERI), prerrequisito indispensable para alimentar el modelo estocástico de llegadas de pedidos, validadas con tests Kolmogorov-Smirnov (alpha = 0,05). Ante la carencia de registros históricos por la inexistencia de Kardex (Causa Raíz P1), se adoptó la decisión metodológica de inicializar el modelo AS-IS asumiendo un almacén lleno, utilizando el mismo valor de capacidad máxima (S) proyectado para el modelo TO-BE, garantizando así una comparación en igualdad de condiciones que demuestra que el sistema empírico colapsa hacia quiebres aun partiendo de inventario pleno. El modelo AS-IS fue validado contrastando el OTIF simulado frente al real. Posteriormente, se formuló una política estocástica (R, s, S) cuyos parámetros se calcularon analíticamente siguiendo la formulación de [18], los principios de operaciones de [17], los fundamentos de gestión de inventarios de [19] y [20], con R = 7 días, z = 1,64 (nivel de servicio 95 %) y tasa de mantenimiento I = 23,3 %.

Para el tercer objetivo, se estimó la inversión inicial con costos verificados del mercado peruano, y se construyó un flujo de caja a 5 años con una tasa de descuento (COK) del 16,59 % (TAMN, SBS, julio 2026 [21]), aplicada como tasa mínima de superación conforme al criterio de [18]. Se calcularon los indicadores VAN, TIR, PRI y B/C, y se cuantificó la relación entre la inversión adicional en stock de seguridad y las penalidades evitadas, contrastando los costos operativos del escenario AS-IS frente al TO-BE.

IV. Resultados

Para el primer objetivo, el análisis ABC por valor de consumo sobre los materiales de 2025 (excluidos 5 proyectos atípicos por encima de S/ 100 000) reveló que los ítems de Clase A, aunque minoritarios en número (21 %), concentran el 80 % del valor de consumo (Tabla I). La empresa carecía de políticas formales de inventario: no empleaba Puntos de Reorden (ROP) ni Stocks de Seguridad (SS), ni siquiera para los materiales Clase A. El control de existencias se realizaba mediante una hoja de Excel rara vez actualizada, sin Kardex transaccional, generando falsos quiebres por desorganización física.

TABLA I
CLASIFICACIÓN ABC DE MATERIALES SEGÚN VALOR DE CONSUMO (2025)

Categoría	% de Ítems	% del Valor de Consumo
Clase A	21 %	80 %
Clase B	25 %	15 %
Clase C	54 %	5 %
Total	100 %	100 %

El análisis de los registros de compra del año 2025 reveló una dependencia crítica de las adquisiciones no planificadas (Tabla II): 122 compras urgentes (62,24 % del total), con un monto de S/ 12 387,99 (15,29 % del costo total de compras) y un sobrecosto de S/ 2 223,53 (17,95 % del monto de urgentes). El sobrecosto porcentual del proveedor urgente frente al proveedor planificado asciende al 21,87 %.

TABLA II
RESUMEN DE COMPRAS URGENTES (2025)

Indicador	Valor
N° de Compras Urgentes	122
Frecuencia de Compras Urgentes	62,24 %
Monto Total de Compras Urgentes	S/ 12 387,99
% del Costo Total de Compras	15,29 %
Sobrecosto Total	S/ 2 223,53
% Sobrecosto respecto a urgentes	17,95 %
% Sobrecosto unitario proveedor urgente	21,87 %

El Nivel de Servicio (medido como OTIF, entrega a tiempo y completa) alcanzó apenas el 77 %, con retrasos de 8 a 10 días en proyectos grandes. El Coeficiente de Variación (CV) de los materiales Clase A supera el 100 % (Tabla III), confirmando la naturaleza estocástica de la demanda MTO y la inutilidad de los métodos empíricos basados en la experiencia.

La consolidación de causas raíz mediante el Diagrama de Ishikawa identificó cinco categorías: Método (planificación reactiva), Medición (sin Kardex), Mano de Obra (comunicación verbal), Medio Ambiente (almacén desorganizado) y Materiales (alta incertidumbre MTO). La Matriz de Vester, cuyo origen de cuadrantes se fijó en 3,18 (media aritmética de influencias y dependencias), criterio adoptado conforme a [22], priorizó como Causas Activas la Inexistencia de Kardex (P1, influencia 12) y la Naturaleza MTO (P9), y como Causa Crítica la Inexistencia de un modelo formal (P11). Las estimaciones empíricas (P10) aparecieron como la causa pasiva más dependiente (12 puntos), confirmando que la reactividad no es una elección del personal sino el resultado inevitable de un sistema sin datos ni modelos matemáticos. La Tabla IV presenta la matriz numérica resultante.

TABLA III
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA DEMANDA PARA MATERIALES CLASE A

Artículo	Media	Desv. Est.	CV
Silicona 3825	17,89	27,43	153 %
Silicona Gen	27,30	42,02	154 %
Cristal Laminado 6mm	9,10	17,68	194 %
Cristal Templado 8mm	16,24	16,42	101 %
Cristal Laminado 8mm	9,77	11,51	118 %
Perfil 2510B	8,81	9,94	113 %
Perfil 2507B	8,81	9,94	113 %
Perfil 2509B	7,58	8,16	108 %
Perfil 2501B	4,61	4,80	104 %
Perfil 2502B	4,61	4,80	104 %

TABLA IV
RESULTADOS MATRIZ DE VESTER

Código	Variable	Influencia (X)	Dependencia (Y)	Clasificación
P1	Inexistencia de Kardex	12	3	Activa
P4	Comunicación informal	3	5	Crítica
P6	Objetos sin etiqueta	5	0	Activa
P9	Naturaleza MTO	5	0	Activa
P10	Estimaciones empíricas	0	12	Pasiva
P11	Inexistencia mod. Inv.	5	5	Crítica

Como primer entregable del segundo objetivo, se desplegó el Kardex digital sobre la arquitectura cloud descrita en la Sección III. El sistema estandarizó las variantes de perfiles de aluminio bajo la nomenclatura SKU [id_material]-[id_plantilla]-[id_acabado]-[id_marca], homologando cuatro proveedores (Corrales, Eduholding, HPD Glass y Limatambo) sin perder trazabilidad histórica. El Modelo Entidad-Relación (Fig.1) centraliza las variantes en la tabla cat_productos_variantes, heredando atributos de tablas maestras mediante llaves foráneas y eliminando la redundancia operativa. Los triggers tg_entrada_kardex y tg_salida_kardex automatizaron la actualización de costos de mercado y fechas de precio en tiempo real, mientras la política de inmutabilidad sobre trx_movimientos garantizó la Exactitud de Registro de Inventario (ERI), prerrequisito para alimentar la política (R, s, S) con datos confiables.

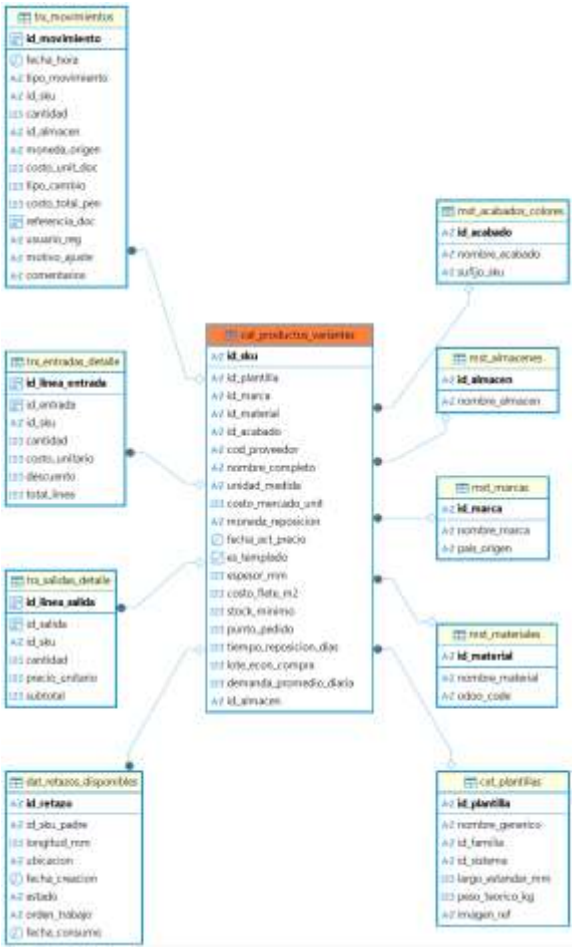


Fig. 1 Diagrama Entidad-Relación del Kardex digital

La interfaz operativa final (Fig. 2), desplegada en Vercel, evidencia la lectura cronológica bloqueada de los movimientos de inventario. Cada transacción (COMPRA, PRODUCCIÓN, AJUSTE o RETORNO) queda registrada con su tipo, cantidad, costo y fecha, sin posibilidad de edición o borrado posterior, garantizando la auditoría completa del flujo físico de los materiales Clase A. Esta visibilidad, inexistente en el escenario AS-IS, constituye el habilitador de la política estocástica presentada a continuación.



Fig. 2 Interfaz del Kardex digital desplegada en Vercel

Para el segundo objetivo, el análisis estocástico mediante Input Analyzer sobre los consumos de las órdenes de trabajo de 2025 determinó que los materiales Clase A (identificados operativamente por sus códigos de perfil y Silicona Negra) se ajustan a distribuciones Lognormales, comportamiento consistente con la alta variabilidad y asimetría positiva características del modelo MTO. El tiempo entre llegadas de pedidos se ajustó a una distribución Weibull desplazada (0,5 + WEIB(5,97; 1,02) días), cuyo parámetro de forma cercano a 1 refleja un comportamiento casi exponencial. Para los plazos de entrega prometidos al cliente, la alta dispersión impidió el ajuste a distribuciones teóricas, por lo que se empleó una distribución empírica continua (CONT). Los lead times se modelaron como constantes (0 días para el proveedor local, 3 días para Lima), y el sobrecosto se parametrizó en 21,87 %. Las distribuciones se validaron con tests K-S y Chi-Cuadrado (alpha = 0,05); para la Silicona Negra, al rechazarse K-S por alta variabilidad (p = 0,0199), se adoptó la Lognormal por registrar el menor error cuadrático (Square Error = 0,007969). El detalle se consolida en la Tabla V.

TABLA V
DISTRIBUCIONES AJUSTADAS PARA LA DEMANDA DE MATERIALES CLASE A

Material	N°	Expresión Arena	$\bar{x}$	CV	K-S p-value	Resultado
2510B / 2507B	49	1 + LOGN(4, 04; 6,57)	5,09	105 %	> 0,15	No se rechaza
2509B	49	2 + LOGN(5, 52; 6,01)	8,09	103 %	0,0519	No se rechaza
2501B / 2502B	49	2 + LOGN(7, 25; 10,1)	10,1	118 %	0,115	No se rechaza
Silicona Negra	103	LOGN(7, 93; 9,98)	8,79	160 %	0,0199	Rechazado*

*Se adopta Lognormal por menor Square Error (0,007969) ante rechazo de K-S (p = 0,0199).

TABLA VI
PARÁMETROS OPERATIVOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Parámetro	Expresión Arena	Fuente
Tiempo entre llegadas	0,5 + WEIB(5,97; 1,02) días	ODT 2025 (Chi² p=0,0723)
Plazo de proyecto	CONT(0; 2; ...; 52) días	Presupuestos 2025 (empírica)
Lead time urgente	0 días (constante)	Entrevista Gerente
Lead time Lima	3 días (constante)	Entrevista Gerente
Sobrecosto urgente	21,87 %	Registros contables
Prob. compra urgente	62 %	Registros de compra 2025

El modelo AS-IS (Fig. 3) es descriptivo: replica el comportamiento del sistema actual para establecer una línea base de comparación. No posee variables de decisión ni función objetivo. Su lógica es reactiva: si el stock disponible es insuficiente, el módulo Decide selecciona aleatoriamente (con probabilidad p_urg = 62,24 %) entre comprar al proveedor urgente local (lead time 0) o al proveedor de Lima (lead time 3

días). Los KPIs de salida se calculan como el promedio de 30 réplicas de 365 días cada una, mediante las ecuaciones (1) y (2):

$$\text{OTIF} = \frac{\text{Entregas_a_tiempo}}{\text{Entregas_a_tiempo} + \text{Entregas_tarde}} \times 100 \qquad (1)$$

$$\text{Costo_Total}_{\text{AS-IS}} = \text{Costo_Sobrecostos} + \text{Costo_Retrasos} + \text{Costo_Ordenar} + \text{Costo_Mantener} \qquad (2)$$

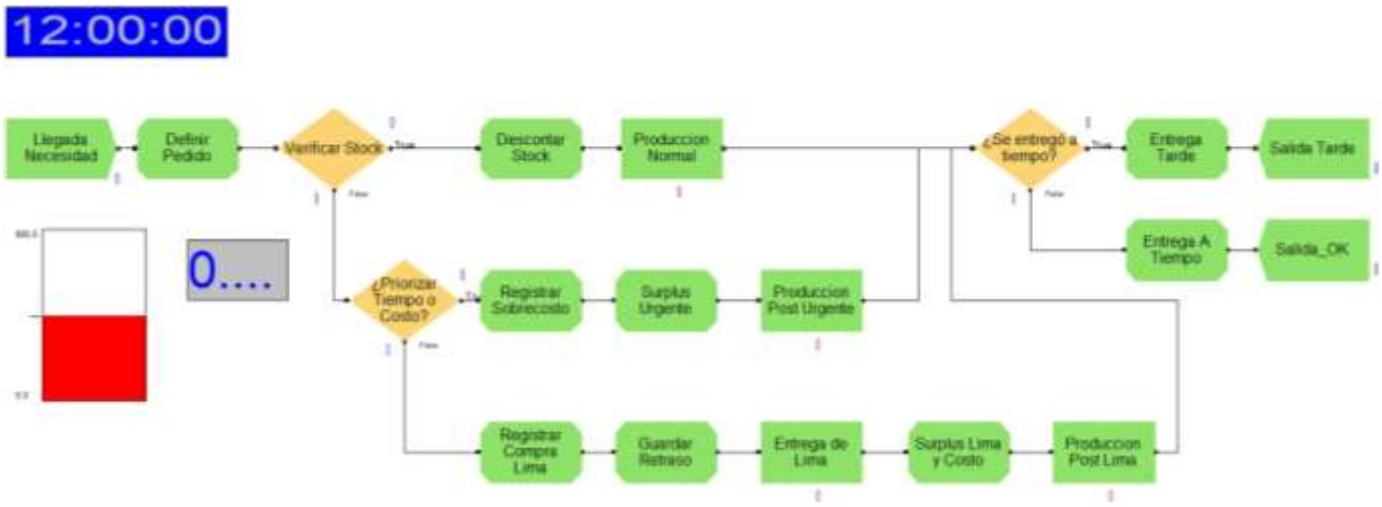


Fig. 3 AS-IS en Rockwell Arena

El modelo AS-IS fue validado contrastando los KPIs simulados frente a los reales. El OTIF individual simulado osciló entre 93,61 % (2509B) y 97,71 % (Silicona Negra). Al calcular el OTIF agregado por multiplicación, el modelo arrojó 74,3 %, estadísticamente coherente con el 77 % real. Asimismo, el porcentaje simulado de compras urgentes (61,6 %) coincide con el real (62,24 %), confirmando la validez estadística del modelo. En términos absolutos, la diferencia entre las 122 compras reales y los 145,6 eventos simulados (19,3 %) se debe a que en taller se suelen agrupar varios materiales en una sola factura de compra, mientras que el simulador registra la falta de cada insumo de manera independiente. La Tabla VII presenta el detalle.

TABLA VII
OTIF Y COMPRAS URGENTES SIMULADOS VS. REALES

Producto	OTIF Sim.	Quiebres	Urgentes	% Urg. Sim.
Silicona Negra	97,71 %	23,93	15,43	64,5 %
2510B	95,08 %	37,10	22,97	61,9 %
2507B	95,54 %	35,40	21,33	60,3 %
2509B	93,61 %	44,80	27,33	61,0 %
2501B	94,56 %	47,93	29,27	61,1 %
2502B	94,56 %	47,93	29,27	61,1 %
OTIF agregado	74,3 %			61,6 %
Valor real	77 %			62,24 %

Posteriormente, se evaluaron tres alternativas mediante una Matriz de Criterios Ponderados con pesos AHP. El modelo continuo (s, Q) obtuvo 2,96 por impedir consolidación de fletes. El periódico (R, S) alcanzó 4,36 pero presentaba vulnerabilidad entre revisiones. El híbrido (R, s, S) obtuvo la puntuación más alta (4,68) al combinar consolidación semanal con un filtro inteligente (s). La Tabla VIII presenta el detalle.

TABLA VIII
MATRIZ DE SELECCIÓN DEL MODELO DE GESTIÓN DE INVENTARIOS

Criterio (Peso)	(s, Q)	(R, S)	(R, s, S)
Consolidación Fletes (45 %)	2 (0,91)	5 (2,27)	5 (2,27)
Protección Quiebres (32 %)	5 (1,60)	3 (0,96)	4 (1,28)
Esfuerzo Revisión (23 %)	2 (0,45)	5 (1,13)	5 (1,13)
TOTAL	2,96	4,36	4,68

Los parámetros se calcularon siguiendo la formulación reportada en [18] y [17]. La demanda anual D se obtuvo de las órdenes de trabajo 2025; la demanda diaria d = D/288 (días laborables). El lead time L = 3 días. El período de revisión R = 7 días. El factor de seguridad z = 1,64 (nivel de servicio 95 %). La desviación estándar diaria sigma_d se estimó aplicando el principio de agregación temporal de [18] en sentido inverso. El costo fijo por pedido A = S/ 27,45 y la tasa de mantenimiento I = 23,3 %. El punto de reorden s, el nivel máximo S y el lote económico Q* se calcularon mediante las ecuaciones (3)-(5), conforme a [23]:

$$s = d(R + L) + \underbrace{(z \times s_d \times \sqrt{R + L})}_{SS} \qquad (3)$$

$$S = s + Q^* \qquad (4)$$

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{IC}} \qquad (5)$$

TABLA IX
PARÁMETROS DEL MODELO (R, S, S) PARA MATERIALES CLASE A

Producto	D (u/año)	d (u/día)	sigma_d	Q* (u)	R_calc (d)	R fijo (d)
Silicona Negra	905,40	3,14	8,39	134	54,0	7
2510B	493,88	1,71	4,89	39	28,8	7
2507B	493,88	1,71	4,89	40	29,6	7
2509B	396,60	1,38	3,44	37	34,1	7
2501B	249,53	0,87	2,21	25	36,6	7
2502B	249,53	0,87	2,21	25	36,6	7

z=1,64; L=3 días; I=23,3 %; A=S/27,45. R_calc: período teórico EOQ; R fijo: ciclo semanal operativo adoptado.

El modelo TO-BE (Fig. 4) incorpora una estructura formal con función objetivo y restricciones. Los parámetros estocásticos son idénticos al AS-IS, garantizando comparación válida. Las variables de decisión s_i y S_i se calcularon analíticamente y se fijaron en el modelo. La función objetivo minimiza el costo total anual de inventario, evaluado como promedio de 30 réplicas mediante (6). El modelo emplea una variable de estado (Pedido_en_Transito) que impide órdenes duplicadas. Las restricciones se presentan en (7):

$$\min Z = \underbrace{A \cdot N_{ord}}_{\text{Costo de ordenar}} + \underbrace{I \cdot C \cdot \overline{Stock}}_{\text{Costo de mantener}} + \underbrace{PM \cdot N_{quiebre}}_{\text{Costo Total sobrecostos}} \quad (6)$$

$$OTIF \geq 0.90;\ S > s;\ s, S \in \mathbb{Z}^{+} \quad (7)$$

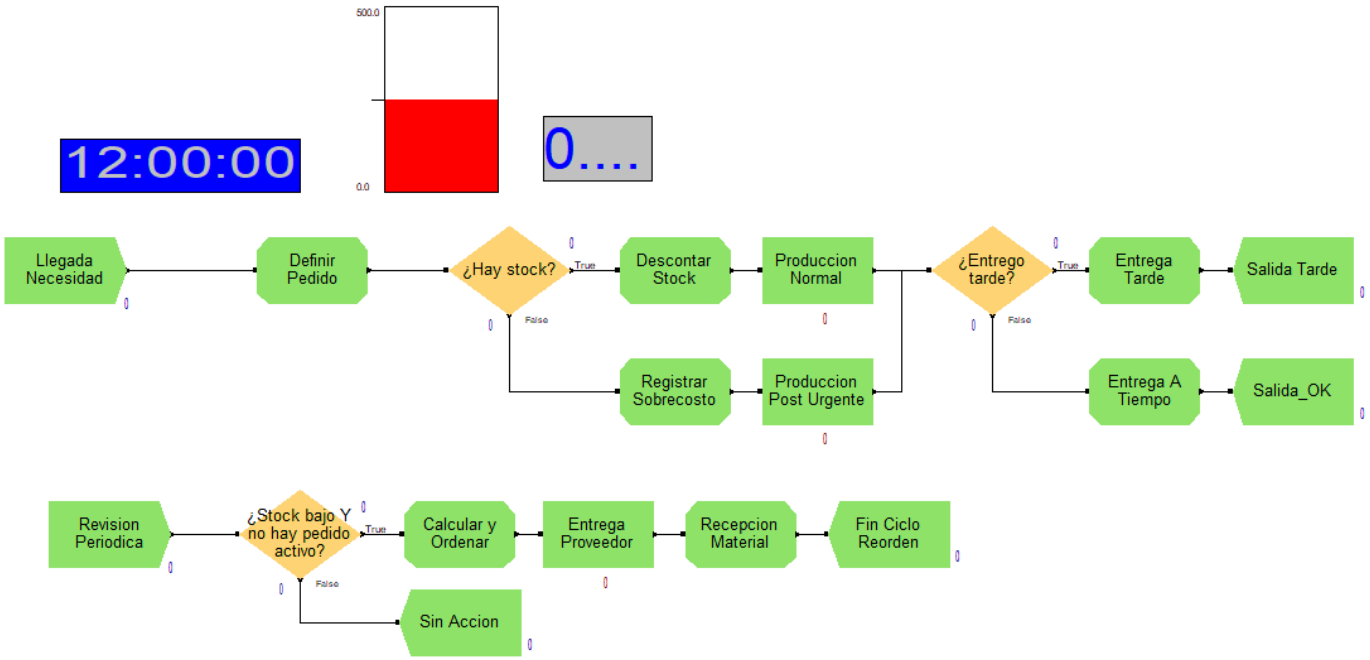


Fig. 4 Modelo TO-BE en Rockwell Arena

El modelo TO-BE proyectó el escenario mejorado bajo las mismas condiciones estocásticas del AS-IS. La Tabla X presenta la comparación agregada. La política (R, s, S) proyectó una reducción del costo total anual en 90,9 %, pasando de S/ 130 209,45 a S/ 11 828,11. El Costo de Ordenar se proyectó reducir 66,9 %, el de Sobrecostos 73,5 %, y el de Penalidades y sobretiempos de taller se proyectó erradicar (de S/ 104 026,25 a S/ 0,00). El único incremento fue el Costo de Mantener (+S/ 3 943,28), inversión deseable en stock de seguridad. Simultáneamente, se proyectó que el OTIF mejoraría de 74,3 % a 100 % y las compras urgentes se redujeron 92,9 %, de 145,6 a 10,3 eventos por año.

TABLA X
COMPARACIÓN AGREGADA DE COSTOS AS-IS VS TO-BE (6 PRODUCTOS CLASE A)

Indicador	AS-IS (S/)	TO-BE (S/)	Variación (%)
Costo de Ordenar	4 695,61	1 552,76	−66,9 %
Costo de Mantener	871,77	4 815,05	+452,5 %
Costo de Sobrecostos	20 615,84	5 460,30	−73,5 %
Costo de Penalidades	104 026,25	0,00	−100,0 %
Costo Total Logístico	130 209,45	11 828,11	−90,9 %
OTIF (Proyecto)	74,3 %	100,0 %	+25,7 pp
Urgentes (ev/año)	145,6	10,3	−92,9 %

Para comprender la naturaleza del ahorro, se analizó la distribución porcentual de los costos (Tabla XI). En el AS-IS, el 79,9 % de los costos provenían de penalidades por retrasos , cifra (S/ 104 026,25) que monetiza los 91,5 pedidos anuales abastecidos desde Lima (38,6 % de los quiebres) cuyos 3 días de lead time (274,5 días de retraso) paralizan la cuadrilla de 4

operarios a una tasa de S/ 380 diarios (S/ 95 por jornal con cargas), sumada a turnos extraordinarios nocturnos y penalidades comerciales de obra. En el TO-BE, las penalidades se eliminan (0 %) y el OTIF converge al 100 % porque los quiebres residuales son absorbidos de inmediato mediante compras de contingencia local con lead time cero (proveedor Santis); el costo residual se distribuye entre mantenimiento (40,7 %) y sobrecostos residuales (46,1 %), concentrados en los productos 2501B y 2502B, cuyas Q* de solo 25 unidades resultan insuficientes para absorber los picos extremos de la distribución Lognormal.

TABLA XI
COMPOSICIÓN ESTRUCTURAL DEL COSTO LOGÍSTICO AS-IS VS TO-BE

Componente	AS-IS (S/)	% Total	TO-BE (S/)	% Total
Penalidades	104 026,25	79,9 %	0,00	0,0 %
Sobrecostos	20 615,84	15,8 %	5 460,30	46,1 %
Ordenar	4 695,61	3,6 %	1 552,76	13,1 %
Mantener	871,77	0,7 %	4 815,05	40,7 %

El análisis estructural revela que la inversión adicional en stock de seguridad (S/ 3 943,28 anuales) representa apenas el 3,8 % de las penalidades evitadas (S/ 104 026,25), confirmando que la falta de una política formal no era un ahorro sino una fuente oculta de pérdidas. La contrastación con las metas del diagnóstico proyecta el cumplimiento de los tres umbrales: la frecuencia de compras urgentes se redujo 92,9 % (meta 66 %), los sobrecostos 73,5 % (meta 66 %) y se estima que el OTIF alcanzaría 100 % (meta 98 %).

Para el tercer objetivo, la Tabla XII detalla la inversión inicial (S/ 6 626,74) y la Tabla XIII presenta el flujo de caja y los indicadores de rentabilidad. Con un COK del 16,59 %, se proyecta que el proyecto generaría un VAN de S/ 296 640,38, una TIR de 1 417 %, un PRI de 0,11 años y un B/C de 11,76, confirmando la viabilidad económica de la propuesta.

TABLA XII
INVERSIÓN INICIAL ESTIMADA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA

Ítem	Costo (S/)
PC Intel Core i3 + Monitor 22" + Windows + Office	1 358,90
Lector código de barras USB 2D (Netum L5)	97,94
Impresora térmica etiquetas RP-365B Dual	280,00
Rollos etiquetas adhesivas (×10 unidades)	80,00
Estantería metálica 5 niveles (Sodimac)	329,90
Capacitación personal (2 sesiones × S/ 200)	400,00
Software Kardex (120 h × USD 10/h)	4 080,00
TOTAL INVERSIÓN INICIAL	6 626,74

TABLA XIII
FLUJO DE CAJA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA (5 AÑOS, COK = 16,59 %)

Concepto	Año 0	Año 1-5	Indicador	Valor
Inversión	−6 627	0	VAN	S/ 296 640
Ingresos	0	118 381	TIR	1 417 %
Costos	0	−8 011	PRI	0,11 años
UAIT	−6 627	110 370	B/C	11,76
IR (RMT)	0	−16 472	COK	16,59 %
FNE	−6 627	93 899	Decisión	APROBAR

V. DISCUSIONES

Para el primer objetivo, el diagnóstico reveló que la ausencia de políticas de inventario obliga a la empresa a depender de las compras urgentes, las cuales representan el 62,24 % de las transacciones y generan un sobrecosto del 17,95 %. Este comportamiento coincide con lo reportado en [1], donde se comprobó que las entregas de emergencia son una consecuencia directa de un abastecimiento deficiente en sistemas ATO (Assemble-to-Order). Como resultado de esta reactividad, el OTIF cae al 77 % debido a los tiempos muertos en el taller; esta realidad operativa coincide con lo reportado en [9], donde se demostró que las urgencias reactivas y la mala planificación destruyen la rentabilidad bruta de las órdenes. El análisis de causas raíz mediante Ishikawa y ABC evidenció que el origen de los quiebres en insumos críticos radica en un almacén desorganizado y la total falta de un Kardex, escenario similar al diagnosticado en [8].

Para el segundo objetivo, los resultados demostraron que la propuesta superó los márgenes de mejora documentados en la literatura. La implementación de un Kardex digital basado en SKU y registros inmutables tiene la capacidad de elevar la ERI del 0 % al 100 %, eliminando teóricamente las discrepancias físicas; este control total es consistente con lo reportado en [14] y en estudios sobre la adopción de Kardex y control de inventarios en empresas peruanas [24]. La decisión de mantener un stock de seguridad de materias primas para amortiguar la naturaleza MTO incrementó el OTIF del 77 % al 100 % simulado, erradicando el 79,9 % de los costos logísticos correspondientes a penalidades. Este aumento absoluto de 23 puntos porcentuales supera lo reportado por [10], donde se alcanzó un nivel de servicio del 89,9 %. El cálculo de (R, s, S) y su validación mediante simulación proyectó reducir las compras urgentes 92,9 % y el sobrecosto 73,5 %. Esto excede con creces la reducción del 66 % demostrada en [1], así como el intervalo de ahorro del 22 % al 66 % establecido en [7]. La caída del 90,9 % en costo logístico confirma que el cálculo analítico de los parámetros (R, s, S), validado mediante simulación de eventos discretos, constituye una alternativa efectiva a los modelos estáticos.

Para el tercer objetivo, la evaluación económica confirmó la viabilidad con un VAN de S/ 296 640, TIR de 1 417 % y B/C de 11,76, indicadores que confirman la viabilidad financiera de la propuesta; si bien una TIR de 1 417 % resulta inusualmente elevada, no responde a una sobreestimación de flujos, sino a la asimetría entre una inversión inicial reducida (S/ 6 626,74 en software cloud y equipos básicos) frente a la erradicación de pérdidas operativas severas (S/ 104 026,25 en penalidades y paradas de cuadrilla), manteniendo su rentabilidad por encima del COK (16,59 %) aun si solo se mitigara el 50 % de dichos costos . El trade-off proyectado de 1 a 26,3 entre inversión en stock de seguridad y penalidades evitadas sugiere que la falta de una política formal no representaba un ahorro, sino una fuente oculta de pérdidas. Como limitaciones, se identificó que los productos 2501B y 2502B presentan un rendimiento inferior (reducción de compras urgentes de 83 %-85 % frente al 97 %-

99 % de los demás), explicado por sus Q* reducidos (25 unidades) y S insuficientes para absorber los picos extremos de la distribución Lognormal. Adicionalmente, el ajuste K-S para la Silicona Negra (CV = 160 %) fue rechazado (p = 0,0199), adoptándose la Lognormal como mejor aproximación disponible por su menor Square Error; esta limitación se mitiga con la naturaleza robusta de la simulación, que evalúa el modelo estocástico completo sin depender exclusivamente del ajuste paramétrico. Como líneas futuras, se recomienda extender el modelo a materiales Clase B, integrar restricciones de espacio físico y capital en una optimización multiobjetivo, y validar empíricamente los parámetros mediante una implementación piloto de seis meses.

VI. Conclusiones

En conclusión, se cumplió el objetivo general de proponer una mejora en la gestión de inventarios para reducir las compras urgentes en una MYPE metalmecánica MTO, mediante el diseño de una política estocástica (R, s, S) evaluada mediante simulación de eventos discretos en Rockwell Arena. Asimismo, se cumplieron los tres objetivos específicos: Se diagnosticó la situación actual, identificando una dependencia del 62,24 % de compras urgentes y la inexistencia de Kardex como causas raíz; se diseñó una propuesta que integró un Kardex digital inmutable con una política (R, s, S) calculada analíticamente, la cual proyectó una reducción del 92,9 % en la frecuencia de compras urgentes y un incremento del OTIF al 100 % simulado mediante reposición local inmediata; y se valoró el impacto económico basado en simulación, estimando indicadores (VAN, TIR, B/C) que confirman la viabilidad financiera de la propuesta. Como paso siguiente, se recomienda la ejecución de la prueba piloto en taller para contrastar en planta las mejoras proyectadas.

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo (USAT) por el apoyo académico brindado durante el desarrollo de esta investigación, así como a la empresa metalmecánica estudiada por facilitar el acceso a los datos operativos necesarios para la validación del modelo de simulación.

Referencias

[1] M. H. Benbitour, E. Sahin, y Y. Dallery, «The use of rush deliveries in periodic review assemble-to-order systems.», *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57, n.º 13, pp. 4078-4097, jul. 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1505059.

[2] McKinsey, «McKinsey Global Supply Chain Leader Survey 2024». Accedido: 30 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/supply-chain-risk-survey-2024

[3] Ministerio de Transportes y Comunicaciones, «Encuesta Nacional de Logistica». febrero de 2020. [En línea]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4331508/Encuesta%20Nacional%20de%20Log%C3%ADstica%202020.pdf?v=1681934904

[4] J. Žic, S. Žic, y G. Đukić, «Quantitative Assessment of Green Inventory Management in Supply Chains: Simulation-Based Study of Economic and Environmental Outcomes Aligned with ISO 14083 Standard.», *Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 20, oct. 2024, doi: 10.3390/app14209507.

[5] S. Shahi y R. Pulkki, «A simulation-based optimization approach to integrated inventory management of a sawlog supply chain with demand uncertainty», *Can. J. For. Res.*, vol. 45, n.º 10, pp. 1313-1326, oct. 2015, doi: 10.1139/cjfr-2014-0373.

[6] «What is Discrete Event Simulation?», Project Production Institute. Accedido: 17 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://projectproduction.org/glossary/discrete-event-simulation/

[7] M. Gocken, A. T. Dosdogru, y A. Boru, «OPTIMIZATION VIA SIMULATION FOR INVENTORY CONTROL POLICIES AND SUPPLIER SELECTION.», *Int. J. Simul. Model. IJSIMM*, vol. 16, n.º 2, pp. 241-252, jun. 2017, doi: 10.2507/IJSIMM16(2)5.375.

[8] R. Leon Castro, M. Vallejos Marquez, C. Caro Flores, I. Idme Medina, y A. Pinto Valdiviezo, «Inventory management: Multi-criteria ABC based on AHP in the warehouse of a metalworking company.», jul. 2025, Accedido: 6 de abril de 2026. [En línea]. Disponible en: https://laccei.org/LACCEI2025-Mexico/meta/FP1103.html

[9] J. Lee, A. Chen, y C.-A. Wu, «Evaluating MTO Order Economic Performance for Parts Processing and Machining Production», *Oper. Supply Chain Manag. Int. J.*, vol. 17, n.º 4, pp. 344-357, dic. 2024, doi: 10.31387/oscm0590446.

[10] J. A. J. Ayhuasi y J. A. T. Gutierrez, «EOQ Inventory Model in a Metalworking MSE with Intermittent Demand: A Case Study», en *Industrial Engineering and Applications*, IOS Press, 2023, pp. 128-139. doi: 10.3233/ATDE230038.

[11] M. A. Andoaga-Mejia, S. Téllez-Ballesteros, y H. R. Solis-Vivanco, «Determination of an optimal inventory system, and safety factor, in a MSME, through Monte Carlo simulation», en *Proceedings of the 22nd International Conference on Modelling and Applied Simulation (MAS 2023)*, CAL-TEK S.r.l., 2023. doi: 10.46354/i3m.2023.mas.004.

[12] T. Phongthiya y C. Kasemset, «Min-Max Policy Implementation for Inventory Management in Steel Supply Sector», *Eng. Technol. Horiz.*, vol. 42, n.º 2, p. 420202, jun. 2025, doi: 10.55003/ETH.420202.

[13] P. Renna, «Comparison of Dynamic Decoupling Point and Dynamic Buffer Level for Flexible Flow Shops in a Hybrid MTS–MTO Production Model», *Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 17, p. 7975, 2024, doi: 10.3390/app14177975.

[14] L. M. Gonzales-León, N. P. Salcedo-Portocarrero, y J. C. Quiroz-Flores, «Inventory Management Model for Reducing Stockout rate by Applying Lean Warehousing and DDMRP Tools in a SMEs in the Commercial Sector», en *2023 the 13th International Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE 2023)*, Singapore: WCSE, jun. 2023. doi: 10.18178/wcse.2023.06.055.

[15] C. M. Anjanni, F. Cahyani, y A. Sultoni, «EOQ Based Inventory Optimization with Partial Backordering and Demand Uncertainty in Manufacturing», *Eurasia Proc. Sci. Technol. Eng. Math.*, vol. 38, pp. 172-179, dic. 2025, doi: 10.55549/epstem.1215.

[16] L. M. Al-Fandi, A. A. Bin Obaid, B. I. Alfailakawi, H. A. Alsubaiei, y S. A. Khudhair, «A simulation study to determine the parameters of medicine inventory policy», *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, vol. 68, n.º 4, pp. 376-382, 2019. doi: 10.3176/proc.2019.4.05.

[17] L. J. Krajewski, *Administracion De Operaciones Procesos y Cadenas de Valor*, 8.ª ed. México: Pearson Educación, 2008. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/911669/Administracion_De_Operaciones_-_LEE_J._K.pdf

[18] R. H. Ballou, C. Mendoza Barraza, y M. J. Herrero Díaz, *Logística Administracion de la cadena de suministro*. Distrito Federal: Pearson Educación, 2004. [En línea]. Disponible en: https://laclassedotblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/05/logistica_administracion_de_la_cadena_de_suministro_5ta_edicion_-_ronald_h-_ballou.pdf

[19] C. J. Vidal Holguín, *Fundamentos de control y gestión de inventarios*, 1.ª ed. Programa Editorial Universidad del Valle, 2010. doi: 10.25100/peu.48.

[20] E. A. Silver, D. F. Pyke, y D. J. Thomas, *Inventory and Production Management in Supply Chains*, 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017. [En línea]. Disponible en: https://nibmehub.com/opac-service/pdf/read/Inventory%20and%20Production%20Management%20in%20Supply%20Chains-.pdf

[21] SBS, «Tasas de Interés Activas de Mercado». Accedido: 11 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.sbs.gob.pe/app/pp/EstadisticasSAEEPortal/Paginas/TIActivaMercado.aspx?tip=B

[22] M. de L. Cisneros Duran, J. C. Gutiérrez Obeso, y I. R. Dzul, «Financiamiento para pequeñas, medianas empresas en el occidente de México», *Adm. Contemp. Rev. Investig.*, vol. 8, n.º 28, p. 46, 2016, [En línea]. Disponible en: https://colparmex.com/wp-content/uploads/2018/11/28.pdf

[23] J. Heizer, B. Render, y Y. Moreno López, *Dirección de la producción y de operaciones- Decisiones Tácticas*. Madrid: Pearson Educación, 2007.

[24] L. N. Vasquez-Layza, N. B. Cerna Rios, y J. C. Escurra-Lagos, «Implementación de estrategias de control de inventarios y gestión de almacenes para reducir costos operacionales en una empresa ferretera Peruana», en *Virtual Edition*, en 4th LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development - LEIRD 2024. Costa Rica, jul. 2024. doi: 10.18687/LEIRD2024.1.1.420.