



LGFS

LABORATORIO DE GEODESIA FÍSICA Y SATELITAL Dr. MELVIN HOYER

REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA



UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Secuenciación de tareas por Algoritmos mediante la Teoría de Lean Manufacturing en el Sector Cartonero

Jairo Orlando Dueñas Guerra 

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Cra. 4 #22-61, Bogotá, Colombia

Autor de correspondencia: jaordugue@gmail.com

<https://doi.org/10.22209/rt.v48a01>

Recepción: 22 octubre 2024 | Aceptación: 10 febrero 2025 | Publicación: 14 marzo 2025.

Resumen

En este estudio sobre el sector del cartón se abordaron diversos procesos, como la impresión, troquelado, descarte, plegado y flejado, en una empresa con problemas operativos previamente identificados. Para ello, se implementaron soluciones utilizando herramientas de Lean Manufacturing y algoritmos de secuenciación de tareas. El análisis se estructuró en cuatro etapas: primero, se recopiló información operativa; luego, se aplicaron técnicas de Lean Manufacturing para optimizar los procesos. La metodología fue de enfoque empírico-inductivo, con análisis de datos y la implementación de algoritmos de secuenciación. La justificación se centró en priorizar una impresora específica, logrando reducir los tiempos de alistamiento en un 35%, lo que se tradujo en una disminución significativa de las horas de trabajo. Se emplearon algoritmos de secuenciación para optimizar la organización laboral, utilizando herramientas colaborativas como Google Collaborative. Los resultados demostraron que estos algoritmos mejoraron los tiempos de procesamiento, reduciendo las horas de trabajo en un 57,6%, lo que sugiere que son una alternativa viable para optimizar el proceso de impresión en empresas de cartón.

Palabras clave: algoritmos de secuenciación, impresión en cartón, Lean Manufacturing, optimización de procesos.

Sequencing of tasks by algorithms through the theory of lean manufacturing in the cardboard sector

Abstract

This study on the cardboard sector addressed various processes, such as printing, die-cutting, discarding, folding, and strapping, in a company with previously identified operational issues. Solutions were implemented using Lean Manufacturing tools and task sequencing algorithms. The analysis was structured in four stages: first, operational data was collected; next, Lean Manufacturing techniques were applied to optimize processes. The methodology was empirical-inductive, with data analysis and the implementation of sequencing algorithms. The justification focused on prioritizing a specific printer, achieving a 35% reduction in setup times, which led to a significant decrease in work hours. Sequencing algorithms were used to optimize task organization, leveraging collaborative tools like Google Collaborative. The results demonstrated that these algorithms improved processing times, reducing work hours by 57.6%, suggesting they are a viable alternative for optimizing the printing process in cardboard companies.

Keywords: carton printing, Lean Manufacturing, process optimization, task sequencing algorithms.

Sequenciamento de Tarefas por Algoritmos Utilizando a Teoria da Manufatura Enxuta no Setor de Papelão

Resumo

Este estudo sobre a indústria de papelão abordou vários processos, como impressão, corte e vinco, descarte, dobra e cintagem, em uma empresa com problemas operacionais previamente identificados. Para isso, foram implementadas soluções utilizando ferramentas de Lean Manufacturing e algoritmos de sequenciamento de tarefas. A análise foi estruturada em quatro etapas: primeiramente, foram coletadas informações operacionais; Técnicas de Manufatura Enxuta foram então aplicadas para otimizar os processos. A metodologia foi empírico-indutiva, com análise de dados e implementação de algoritmos de sequenciamento. A justificativa se concentrou em priorizar uma impressora específica, reduzindo o tempo de configuração em 35%, o que resultou em uma redução significativa nas horas de trabalho. Algoritmos de sequenciamento foram utilizados para otimizar a organização do trabalho, utilizando ferramentas colaborativas como o Google Collaborative. Os resultados mostraram que esses algoritmos melhoraram os tempos de processamento, reduzindo as horas de trabalho em 57,6%, sugerindo que eles são uma alternativa viável para otimizar o processo de impressão em empresas de papelão.

Palavras-chave: algoritmos de sequenciamento, impressão em papelão, Lean Manufacturing, otimização de processos.

Introducción

La gama de productos en una empresa cartonera es variada y se expande según nuevas utilidades del cartón, como publicidad, mobiliaria, soportes y material didáctico (Mera-Silva, 2024). Los productos más representativos incluyen cajas de empaque de distintas medidas, cajas de doble pared para transporte largo y protección de productos delicados, bandejas de frutas resistentes a la humedad, cajas de doble cuerpo para grandes dimensiones, cajas telescópicas para el sector floricultor, cajas troqueladas para archivo, lámina troquelada para usos industriales, single face para empaques, particiones para envases de vidrio y esquineros para cargas muertas (Ponce Telles y Gómez Romero, 2022). Según Quishpe (2021), las cajas de cartón corrugado son fundamentales en la industria del envase y embalaje por la protección que brindan. Ayerst (2015, citado en Quishpe, 2021, p. 537) destaca la fabricación de cajas decorativas con diseños impresos.

No todas las empresas ofrecen todos estos productos, ya que requieren maquinaria especial o se producen manualmente (particiones, esquineros, etc.) y su mercado es limitado. La organización de procesos depende del tamaño de la empresa, recursos, tecnología y materia prima. A través del tiempo han surgido nuevas invenciones, técnicas y herramientas que buscan facilitar y mejorar el desarrollo de las actividades (Peña Guarín et al., 2020; Caro Dávila y Ponce de León Vargas, 2021). Factores como la planeación de la producción afectan directamente los procesos. Jiménez-León (2020) menciona que una planeación subjetiva no aprovecha las características similares entre pedidos, generando tiempos de alistamiento innecesarios y sobrecostos. Por lo tanto, es una prioridad abordar este problema. Para ello, se recomienda la utilización de un software especializado en áreas de ingeniería de operaciones (Salazar Otálora et al., 2023).

Para mejorar los procesos industriales se utilizan técnicas como los algoritmos secuenciadores, que han demostrado eficiencia en diferentes procesos productivos (Veliz-Camargo y Maytan-Huamanchao, 2024). La combinación de progresos en matemática, informática y tecnología ha creado nuevas realidades, permitiendo algoritmos que van más allá de operaciones simples, ofreciendo posibilidades antes vistas en ciencia-ficción (Rodríguez Cardo, 2022). Ejemplos de aplicabilidad incluyen optimización en empresas de vehículos usados, redes de distribución eléctrica, horarios estudiantiles y selección de calibres de conductores eléctricos (Mendoza et al., 2020; Mejía Viteri et al., 2022; Aguirre Morillo y Toapanta Barreiro, 2021; Chávez-Bosquez et al., 2015; Romero-Conrado et al., 2020; Montoya et al., 2018). Los objetivos principales de la programación de producción son cumplir fechas de entrega, reducir tiempos de entrega, minimizar alistamiento, reducir inventario de producto en proceso y maximizar la utilización de máquinas y mano de obra.

Este estudio de investigación tiene como objetivo optimizar los procesos del sector cartonero en una empresa con problemas operativos. Se analizaron y mejoraron procesos clave como impresión, troquelado, descartonado, plegado y zunchado. Se propusieron soluciones basadas en Lean Manufacturing y algoritmos de secuenciación para

reducir tiempos y mejorar la eficiencia (Mathiyazhagan et al., 2022; Manzano Rodríguez y Ramos Alfonso, 2023). La implementación de Lean Manufacturing promueve una cultura de mejora continua y adaptación a cambios en el entorno (Puertas Aragón y Lozada Rivera, 2024). La metodología Lean Manufacturing se define como un modelo de gestión de excelencia que elimina desperdicios sin valor, aplicando herramientas como 5S y SMED. Esta filosofía optimiza procesos de producción eliminando actividades sin valor desde el inicio hasta el cierre, mejorando la economía y ahorro de recursos (Vargas Crisóstomo y Camero Jiménez, 2021).

Materiales y Métodos

Compilación de datos operacionales

El primer paso de la investigación consistió en digitalizar las minutas de trabajo diarias de cada turno y tripulación. Esta base de datos operacionales incluyó información relevante sobre las diferentes categorías de productos y parámetros del proceso, tales como la cantidad de tintas, dimensiones de la lámina, tipo de pestaña, unidades procesadas y tiempos improductivos de las cuatro impresoras/troqueladoras.

Durante la inspección preliminar, se observó que solo la impresora S Y S tenía cifras de proceso en todas las categorías de productos determinadas. De los 1194 trabajos procesados, el 33% fueron realizados en dicha máquina, la cual también utilizaba la mayor cantidad de horas trabajadas. Por estas razones, se eligió la impresora S Y S para desarrollar los objetivos del estudio.

Cálculo de los tiempos improductivos

Para calcular los tiempos improductivos de la impresora S Y S, se identificaron y monitorearon 21 factores que fueron reportados en las minutas diarias de trabajo. Los datos fueron recogidos durante el período de estudio y se sumaron para obtener el tiempo total improductivo. La Tabla 1 detalla los factores reportados y la Figura 1 los tiempos improductivos en cada factor.

Tabla 1. Factores de tiempos improductivos

Factores Reportados		
01 Preparación de tintas	08 Daño plancha	15 Espera de aprobación
02 Aseo de puestos de trabajo	09 Daño máquina	16 MP ondulada
03 Mantenimiento máquina	10 Falta de cuchillas	17 MP quebradiza
04 Reuniones	11 Falta de energía eléctrica	18 Lavado planchas y cubetas
05 Orden y aseo planta	12 Falta aire	19 Problemas de medida de la lámina
06 Buscar planchas	13 Buscar lámina	20 Arreglar montaje planchas
07 Armar troqueles	14 Buscar herramientas, cuchilla etc.	21 Problemas zunchadora

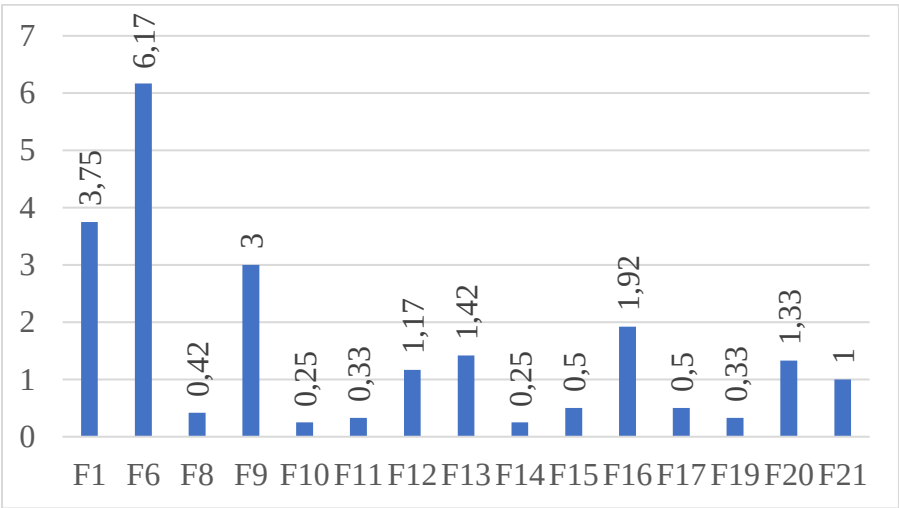


Figura 1. Tiempos improductivos para los factores reportados.

Técnicas aplicadas

El método Lean Manufacturing, que implica la mejora continua de las operaciones, fue adoptado como filosofía para el diseño del plan estratégico del estudio (Malpartida Gutiérrez, 2020). Se investigaron las técnicas de Lean Manufacturing más empleadas y, según la revisión de Cano y Escobar (2018), se seleccionaron las técnicas 5 S y Single Minute Exchange Die (SMED).

La técnica 5 S se basa en cinco principios: Clasificar (Seiri), Ordenar (Seiton), Limpiar (Seiso), Estandarizar (Seiketsu) y Sostener (Shitsuke), para crear un ambiente de trabajo organizado y eficiente, eliminando desperdicios (Mehta y Dave, 2020). Se eligió por su capacidad de proporcionar soluciones rápidas y económicas a problemas que generen retrasos y tiempos improductivos.

La técnica Single Minute Exchange Die (SMED) busca reducir los tiempos de cambio entre operaciones mediante la separación de ajustes internos y externos, estandarización de tareas y uso de herramientas rápidas (Davalos Román *et al.*, 2023). Se seleccionó por su efectividad en proporcionar resultados rápidos y económicos, y se utilizó para optimizar las actividades de alistamiento de la máquina y la impresión/troquelado.

Digitalización y depuración de datos

Se digitalizaron los reportes diarios de producción de cuatro meses (agosto, septiembre, octubre y noviembre) del año 2019. Después de depurar la información, se obtuvo una base de datos con 31,219 celdas que incluía datos específicos del proceso como:

- Impresora utilizada
- Cliente, referencia, cantidad solicitada, clave
- Medidas de la lámina
- Cantidad de tintas
- Tiempo empleado
- Inconvenientes sucedidos
- Metros cuadrados procesados

La información fue organizada y se identificaron cinco categorías de productos. Estas categorías se describen más adelante en la Figura 3, donde se observa que la impresora S Y S cumple con todas las categorías identificadas.

Aplicación de algoritmos de secuenciación

Para optimizar la secuenciación de tareas y minimizar los tiempos de alistamiento en la impresora S Y S, se implementaron varios algoritmos de secuenciación utilizando Google Colaborative. Los algoritmos empleados fueron:

- Búsqueda Tabú (Tabu Search): Utiliza una memoria adaptativa y una exploración exhaustiva para evitar óptimos locales prematuros, mejorando la eficiencia del historial de movimientos (Tan *et al.*, 2021; Ñaupari Huatuco *et al.*, 2022; Martí *et al.*, 2023).
- Recocido Simulado (Simulated Annealing): Realiza movimientos de escala controlados para alcanzar un equilibrio entre exploración y explotación, facilitando la convergencia hacia soluciones óptimas (Hernández-Vázquez *et al.*, 2019; Guilmeau *et al.*, 2021; Pardalos y Mavridou, 2024).
- Búsqueda Local Guiada (Guided Local Search): Usa penalizaciones aplicadas a ciertos movimientos para guiar la búsqueda hacia áreas prometedoras y mejorar resultados (Alsheddy *et al.*, 2018).

Los datos de procesamiento de la impresora S Y S recogidos durante 4 meses se dividieron en 8 grupos de 15 días. Se asignaron prioridades a cada pedido según categoría de producto, cantidad de tintas, tipo de pestaña y medidas de la lámina, para disminuir los tiempos de arreglo. Se crearon matrices para colores, pestañas y medidas de la lámina, asignando pesos según la similitud entre pedidos. Los valores aumentaron si la diferencia entre pedidos era mayor, dificultando el alistamiento. Si los pedidos eran similares, el valor asignado era menor, facilitando el alistamiento. Con los resultados obtenidos, se reasignaron nuevos factores de montaje y se recalcularon los tiempos de alistamiento.

Recolección de datos y procedimientos adicionales

Los datos fueron recolectados durante un período de cuatro meses (agosto a noviembre de 2019). Las pruebas fueron administradas en el entorno de producción, explicando a los participantes la naturaleza voluntaria de su participación.

Para la recolección de datos en este estudio, se realizó un análisis estadístico de los tiempos de proceso en la impresora S Y S. Los datos fueron calculados en función del tiempo requerido por unidad, a partir de los registros históricos de la máquina. Durante la inspección preliminar, se observó que solo la impresora S Y S tenía cifras de proceso en todas las categorías de productos determinadas. De los 1194 trabajos procesados, el 33% fueron realizados en dicha máquina, la cual también utilizaba la mayor cantidad de horas trabajadas. Por estas razones, se eligió la impresora S Y S para desarrollar los objetivos del estudio. La Figura 2 muestra los metros cuadrados procesados por categoría en cada máquina, destacando que la categoría 1 de la impresora S Y S es la que procesa mayor cantidad de metros cuadrados. Esto permitió identificar los elementos de mayor impacto en los tiempos de producción.

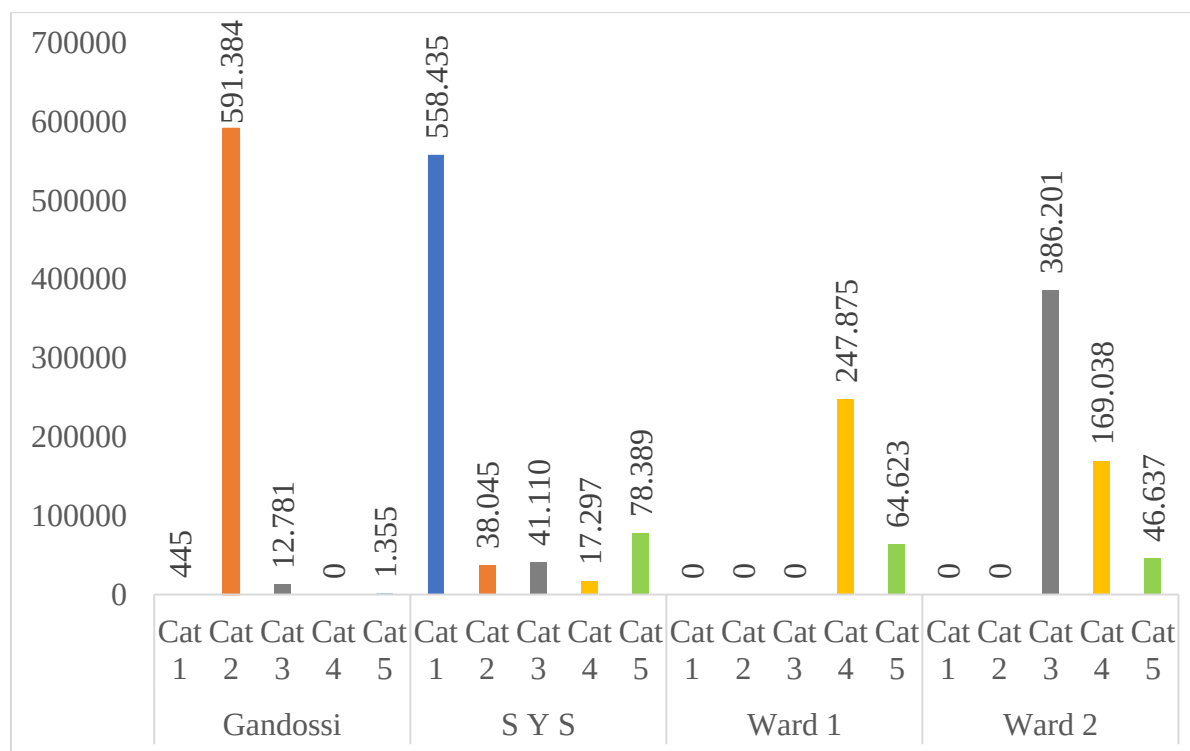


Figura 2. Metros cuadrados por categoría en cada máquina.

La metodología incluyó una segmentación por factores de montaje, dividiendo los datos en cuatro factores identificados como relevantes para el proceso de impresión. Los datos de la categoría 1 se segregaron en función de los cuatro factores de montaje, que afectan los tiempos de alistamiento y procesamiento:

- Factor 1: Montaje exacto al anterior, no hay cambios de tinta o cuchillas ni lavado, sin necesidad de alistamiento adicional.
- Factor 2: Montaje similar en algunos aspectos (tintas, medidas, aleta de la caja), con ahorro de tiempo en alistamiento.
- Factor 3: Montaje no similar al anterior, requiriendo lavado y alistamiento completo.
- Factor 4: Primer montaje del turno, con alistamiento desde cero.

Esto facilitó un análisis detallado y específico que permitió evaluar el peso y la contribución de cada factor en los tiempos totales de operación, proporcionando así una base sólida para potenciales mejoras en eficiencia.

Herramientas utilizadas

Se emplearon herramientas estadísticas y algoritmos de programación en el entorno R para la simulación de resultados y la optimización de procesos industriales (Egas-García, et al, 2022).

Resultados y Discusión

Inicialmente se analizaron las cinco categorías de proceso y se observó que las impresoras S Y S y GANDOSI pueden procesar todas las categorías (Figura 3). La Figura 4 presenta los porcentajes de procesamiento de cada categoría. Sin embargo, se notó que los procesados por la impresora GANDOSI requieren más tiempo debido al gran tamaño de la máquina. Por esta razón, la impresora GANDOSI se utiliza principalmente para procesar cajas grandes y tapas de flores (categoría 3).

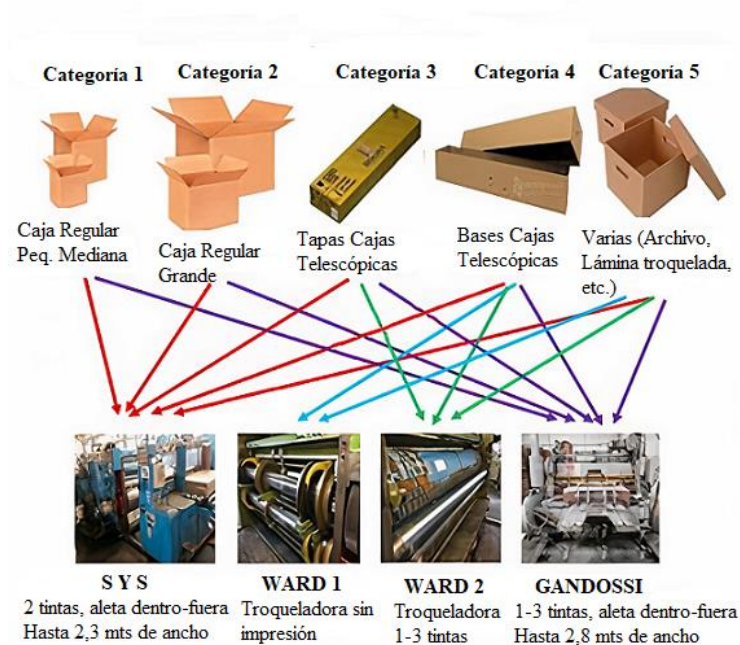


Figura 3. Categorización de los productos de la empresa cartonera.

		Metros cuadrados	Total	% Categoría	% Impresora
S Y S	Categoría 1	558.435	733.276	76 %	33 %
	Categoría 2	38.045		5 %	
	Categoría 3	41.110		6 %	
	Categoría 4	17.297		2 %	
	Categoría 5	17.297		11 %	
GANDOSI	Categoría 1	445	605.965	0 %	27 %
	Categoría 2	591.384		98 %	
	Categoría 3	12.781		2 %	
	Categoría 4	-		0 %	
	Categoría 5	1.355		0 %	
WARD 1	Categoría 4	247.875	312.498	79 %	14 %
	Categoría 5	64.623		21 %	
WARD 2	Categoría 3	386.201	601.876	64 %	27 %
	Categoría 4	169.039		28 %	
	Categoría 5	46.637		8 %	
Total		2.253,615	2.253,615	400 %	100 %

Figura 4. Producción y categorías por impresora.

En la Figura 4 se evidencia que la impresora S Y S procesa el 33 % de los metros cuadrados, además es una máquina versátil y se tienen datos de proceso para todas las categorías. En el sector cartonero la unidad de referencia para controlar los procesos no son las unidades procesadas sino los metros cuadrados procesados porque entre más grande sea la caja mayor es su valor, agrupando cada categoría y analizándola por metros cuadrados se obtiene lo mostrado en la Figura 5.

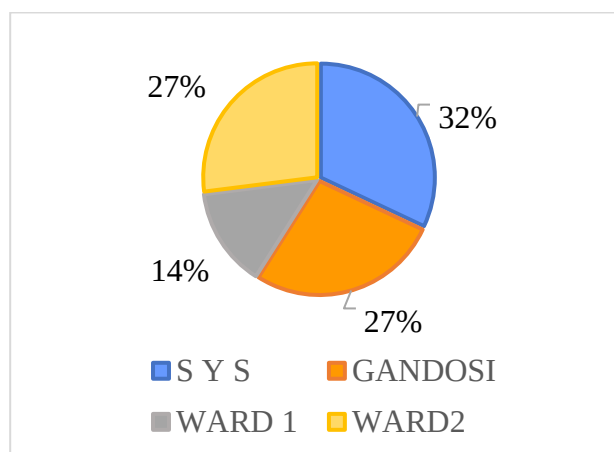


Figura 5. Porcentaje de metros cuadrados procesados por categoría e impresora.

Como se observa, la impresora S Y S procesa el mayor porcentaje de material (cartón) seguida por las GANDOSI y WARD 2 aunque es evidente que cada impresora tiene una categoría en la que se destaca, la S Y S es la que mejor se ajusta al procesamiento de todas las categorías y por ende la importancia de su estudio para obtener resultados confiables.

En la Figura 6, se muestra los metros cuadrados, horas, unidades, tiempos improductivos y los montajes realizados para la impresora S Y S donde destaca que dicha impresora por la variedad de categorías que maneja tiene reportado la mayor cantidad de tiempos improductivos con 22,3 horas (39%) y la mayor cantidad de montajes con 609 cambios (51%). Los detalles sobre cómo se calcularon los tiempos improductivos se encuentran en la sección de Metodología.

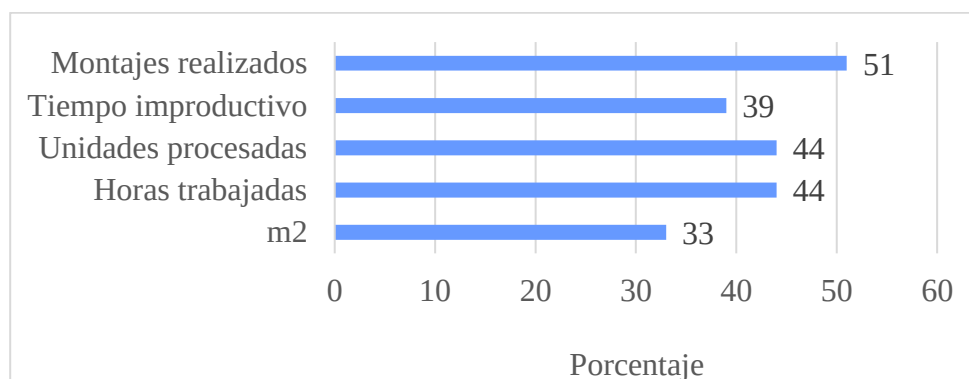


Figura 6. Porcentajes operativos de la impresora S Y S.

De igual manera se determinaron los montajes realizados y el factor entre cada montaje, según se explica en la metodología. Al analizar los Factores entre montaje se evidenció que los porcentajes con número 1 fueron los más bajos al compararlos con otros factores (Figura 7), se entiende que eso se relaciona directamente con las ventas de la compañía, pero debe ser una meta a corto plazo lograr su incremento en la medida de lo posible, es necesario aumentar su porcentaje en la máquina para tener un mayor aprovechamiento de la impresora.

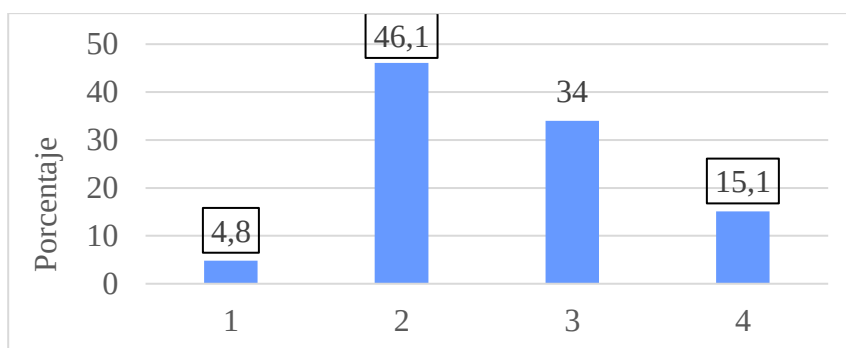


Figura 7. Porcentajes de los factores por montaje de la impresora S Y S.

La impresora S Y S procesa principalmente la categoría 1, puede procesar cajas grandes, pero maniobrar lámina de grandes dimensiones en la bandeja de alimentación de la impresora es complicado porque no es tan espaciosa, además abrir las bandas de los cuerpos de impresión y troquelado es incómodo porque están por la parte inferior de la máquina, siendo muy demorado este tipo de alistamiento.

En la Tabla 2 se sintetizan los datos estadísticos de la impresora S Y S sobre los tiempos por unidad que se calcularon con los tiempos de proceso reportados. Luego se concentra puntualmente en la categoría 1 que es la de mayor concentración en la máquina y después se segrega por cada uno de los 4 factores de montaje identificados.

Tabla 2. Resumen estadístico de la impresora S Y S.

<i>S Y S tiempo / unidad (min)</i>		<i>S Y S CATEGORÍA 1 tiempo / unidad (min)</i>		<i>S Y S CATEGORÍA 1 FACTOR 1 tiempo / unidad (min)</i>	
Media	0,094	Media	0,095	Media	0,048
Error típico	0,002	Error típico	0,002	Error típico	0,003
Mediana	0,083	Mediana	0,084	Mediana	0,045
Moda	0,08	Moda	0,12	Moda	0,059
Desv. estándar	0,042	Desv. estándar	0,024	Desv. estándar	0,012
Varianza de la muestra	0,002	Varianza de la muestra	0,002	Varianza de la muestra	0,000
Curtosis	4,714	Curtosis	4,995	Curtosis	-1,140
Coefficiente de asimetría	1,864	Coefficiente de asimetría	1,932	Coefficiente de asimetría	0,167
Rango	0,278	Rango	0,264	Rango	0,039
Mínimo	0,017	Mínimo	0,03	Mínimo	0,03
Máximo	0,294	Máximo	0,294	Máximo	0,069
Suma	57,120	Suma	50,046	Suma	1,017
Cuenta	609	Cuenta	526	Cuenta	21
Nivel de confianza (95 %)	0,003	Nivel de confianza (95 %)	0,004	Nivel de confianza (95 %)	0,005

<i>S Y S CATEGORÍA 1 FACTOR 2 tiempo / unidad (min)</i>		<i>S Y S CATEGORÍA 1 FACTOR 3 tiempo / unidad (min)</i>		<i>S Y S CATEGORÍA 1 FACTOR 4 tiempo / unidad (min)</i>	
Media	0,086	Media	0,109	Media	0,108
Error típico	0,002	Error típico	0,004	Error típico	0,005
Mediana	0,078	Mediana	0,095	Mediana	0,1
Moda	0,08	Moda	0,12	Moda	0,1
Desv. estándar	0,034	Desv. estándar	0,047	Desv. estándar	0,043

S Y S CATEGORÍA 1 FACTOR 2 tiempo / unidad (min)		S Y S CATEGORÍA 1 FACTOR 3 tiempo / unidad (min)		S Y S CATEGORÍA 1 FACTOR 4 tiempo / unidad (min)	
Varianza de la muestra	0,001	Varianza de la muestra	0,002	Varianza de la muestra	0,002
Curtosis	7,665	Curtosis	3,793	Curtosis	3,741
Coeficiente de asimetría	2,253	Coeficiente de asimetría	1,840	Coeficiente de asimetría	1,715
Rango	0,250	Rango	0,243	Rango	0,228
Mínimo	0,044	Mínimo	0,046	Mínimo	0,052
Máximo	0,294	Máximo	0,289	Máximo	0,28
Suma	22,288	Suma	19,074	Suma	7,667
Cuenta	259	Cuenta	175	Cuenta	71
Nivel de confianza (95 %)	0,004	Nivel de confianza (95 %)	0,007	Nivel de confianza (95 %)	0,010

En el primer cuadro se muestran las estadísticas generales de las 609 cifras de la impresora S Y S, con una media de 0,094 y una desviación estándar de 0,042 lo que indica un coeficiente de variación (CV) de 45% que demuestra que los datos tienen una alta variación respecto al promedio. Se puede observar que al centrarse los datos en la categoría 1, que es la familia de productos más adecuada para ser procesada en esta máquina, tanto la media como la desviación estándar cambian. Estos indicadores también cambian por cada uno de los 4 factores de montaje, con el factor 1 la media es de 0,048 y la desviación es de 0,012, resultando un CV de 25% lo cual evidencia una menor dispersión de los datos. Para los demás factores el CV fue mayor, con 39, 47 y 39% para los factores 2, 3 y 4 respectivamente, demostrando que los tiempos de alistamiento dan mayor variabilidad según el factor de montaje. El porcentaje de alistamiento para el Factor 1 es bajo porque no hay alistamiento, mientras que en los otros factores este porcentaje va aumentando.

Se identificaron también los Coeficientes de Correlación lineal de Pearson entre las columnas de datos para identificar cuales tienen una relación directa entre sí, encontrando que los datos de las unidades entregadas y los metros cuadrados totales tienen relación con el tiempo de proceso reportado; lo mismo pasa con el tiempo unitario en relación al tiempo unitario multiplicado por el factor de montaje, esto significa que el factor de montaje influye considerablemente en el tiempo unitario (Tabla 3).

Tabla 3. Correlación de variables de la impresora S Y S.

Relación	Coeficiente de Correlación R
Unidades entregadas-Tiempo de proceso reportado (min)	0,749
Metros cuadrados totales-Tiempo de proceso reportado (min)	0,743
Tiempo (min)-Tiempo unit x Factor de montaje	0,877
Metros cuadrados totales-Tiempo (min)	-0,183
Unidades entregadas-Tiempo (min)	-0,442
Tiempo (min)-Factor de montaje	0,272
Tiempo (min)-Factor de montaje x m ²	-0,208
Tiempo (min)-Tiempo de proceso reportado (min)	0,039
Tiempo (min)-Número de tintas	0,266

Después de analizar la condición inicial de la impresora S Y S, se aplicó la técnica SMED, cuyo objetivo es reducir los tiempos de alistamiento o de cambio entre procesos que requieren la detención de la máquina, convirtiéndolos en tiempos productivos o que aporten valor agregado. Para el cálculo de los tiempos de alistamiento, se tomaron como referencia los tiempos unitarios de los pedidos con factor 1. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Porcentajes de alistamiento por categorías.

Prom. Factor 1	%	Total	Aleta	Factor 4	Factor 3	Factor 2	Categoría	Observación
0,049	+5	0,0515	Dentro	50%	47%	37%	1	
0,048	+5	0,0504	Fuera	43%	39%	30%	1	
0,048	+5	0,0504	Dentro	52%	40%	22%	2	Pocos datos
0,052	+5	0,0546	Fuera	48%	44%	35%	2	Pocos datos
0,049	+5	0,0515	NA	54%	46%	26%	3	
0,060	+5	0,0630	NA	24%	22%	13%	4	Pocos datos
0,071	+5	0,0746	NA	16%	13%	8%	5	Pocos datos

El factor de montaje 4 en la impresora S Y S, dentro de las categorías 1, 2 y 3, se encuentra en promedio alrededor del 50%. Esto sugiere que un alistamiento desde cero representa la mitad del tiempo total reportado, mientras que la otra mitad corresponde al procesamiento del pedido. Estudios que aplican la técnica SMED en procesos de flexografía sobre sustratos plásticos, un proceso técnicamente similar a la impresión sobre liner kraft utilizado en cajas de cartón, han mostrado una reducción de tiempos de proceso entre el 29% y el 75%, con un valor promedio de disminución del 41%. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Nuevos tiempos de alistamiento después de mejoras en el proceso.

Factor 4			Factor 3			Factor 2			Factor 1	Totales		Categorías
%	TA	TM	%	TA	TM	%	TA	TM	TA (min)	TA	TM	
DM	(min)	(min)	DM	(min)	(min)	DM	(min)	(min)		(min)	(min)	
40	6565	5405	39	13246	10975	26	20520	18012	805	4113	35197	Categoría 1
										6		Aleta
33	4590	3973	30	12600	10746	22	11365	9983	1315	2987	26017	dentro-
41	220	180	30	130	112	16	190	177	290	0	759	fuera
										830		Categoría 2
38	310	260	34	680	558	27	550	484	140	1680	1442	Aleta
												dentro-
44	550	449	36	2050	1698	19	1250	1131	150	4000	3428	fuera
16	530	494	13	280	257	8	390	183	120	1320	1054	Categoría 3
8	2885	2744	7	1140	1081	3	881	827	920	5826	5572	Categoría 4
												Categoría 5

%DM: porcentaje después de la mejora TA: tiempo actual TM: tiempo después de la mejora

Se recalcularon los tiempos de alistamiento aplicándoles una disminución del 35 % teniendo la siguiente tabla resumen para la impresora S Y S. Con estos nuevos porcentajes se establecieron nuevos tiempos de proceso, siendo el resultado de la aplicación teórica de las herramientas Lean. La disminución se efectuó sobre el alistamiento establecido en cada OP según las cifras del factor 1 para cada categoría de producto, realizándose para las OP del factor de montaje 2, 3 y 4. Para factor 1 no se desarrolló porque no tiene alistamiento y es 100% tiempo de procesamiento.

Para el uso de algoritmos de secuenciación se disponen de 609 datos del procesamiento en la impresora S Y S en 4 meses. Como no se dispone de la fecha de ingreso a producción ni del compromiso de entrega, entonces se agruparon en conjuntos de 15 días, porque esa es la política de entrega y teniendo 8 grupos como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Agrupación de los datos para el análisis por algoritmo secuencial.

No	Intervalo de fecha	Cantidad de pedidos
1	Agosto 1 al 15	70
2	Agosto 16 al 31	45
3	Septiembre 1 al 15	88
4	Septiembre 17 al 29	70

5	Octubre 1 al 13	72
6	Octubre 16 al 31	76
7	Noviembre 2 al 15	68
8	Noviembre 16 al 30	120

Para cada uno de los 8 conjuntos de datos, se buscó minimizar los tiempos de alistamiento mediante una secuenciación de trabajos que aproveche las diferencias en las características de cada pedido y mantenga bajo el peso total de la secuencia. La Tabla 7 resume los resultados, mostrando el peso asociado a cada algoritmo de secuenciación utilizado.

Tabla 7. Resultados de los algoritmos de secuenciación.

	Búsqueda Tabú	Recocido simulado	Búsqueda local guiada
Agosto 1 al 15	42	45	41
Agosto 16 al 31	44	45	43
Septiembre 1 al 15	46	49	49
Septiembre 17 al 29	49	49	49
Octubre 1 al 13	30	30	30
Octubre 16 al 31	46	46	46
Noviembre 2 al 15	47	47	47
Nov. 16 al 30	92	92	92
Total	396	403	397

A primera vista los resultados muestran diferencias entre los tres algoritmos de secuenciación, observándose que la Búsqueda Tabú presenta un peso total más bajo (396). Para determinar si las diferencias entre los tres algoritmos de secuenciación eran significativas se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Los resultados mostraron que el valor P era 0.99, lo cual es mucho mayor que el umbral de significancia de 0.05. Esto indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los algoritmos probados. Por lo tanto, los tres algoritmos presentan un rendimiento similar en el contexto de este estudio.

En los primeros dos conjuntos de datos (agosto 1 al 31), la Búsqueda Local Guiada produjo pesos más bajos, sugiriendo un buen rendimiento en esas instancias. A partir del cuarto conjunto de datos (octubre 1 al 13) hasta el octavo (Noviembre 16 al 30), los resultados fueron idénticos para los tres algoritmos, lo cual facilitó la selección de la secuencia óptima al elegir el peso más bajo entre los tres en cada período.

A partir de estos resultados, se procedió a reasignar los factores de montaje y recalcular los tiempos de alistamiento para generar nuevos escenarios de optimización, denominados como sigue:

- Escenario 1: Situación actual del proceso
- Escenario 2: Después de usar los algoritmos de secuenciación

La comparación entre la variación de acuerdo a los factores de montaje para los escenarios 1 y 2 se muestra en la Tabla 8, donde se observa que con los algoritmos de secuenciación se logró un aumento en los factores de montaje 1 (0 alistamiento) y 2 (alistamiento bajo porque las características de los pedidos son muy similares), pasando de 29 pedidos a 69 en el factor 1 y de 281 a 457 en el factor 2. Por consiguiente, los factores 3 y 4 disminuyeron, logrando cumplir una de las prioridades del estudio al incrementar los factores 1 y 2.

Tabla 8. Variación de los factores entre montaje.

Factor entre montajes	Escenario 1		Escenario 2			%
	Cant. Pedido	% participación	Cant. Pedidos	% participación		
1	29	4,8	69	11,3	137,9	Incremento
2	281	46,1	457	75	62,6	Incremento
3	207	34	73	12	64,7	Disminución
4	92	15,1	10	1,6	89,1	Disminución
Total general	609	100	609	100		

Al analizar la secuenciación de trabajo propuesta con los algoritmos, se identifica como aumento los factores 1 y 2, que son buenas decisiones porque retiran pedidos de los factores 3 y 4. Además se encontró disminución de pedidos con los factores 1 y 2 para pasar a los factores 2, 3 y 4 lo que técnicamente puede incrementar el alistamiento.

Se observó que los factores críticos del proceso de impresión y producción de cajas de cartón en la empresa tomada como ejemplo son el tiempo de proceso y el factor de montaje, a partir de los cuales se planteó el desarrollo de los algoritmos secuenciadores. En concordancia con lo observado en el presente estudio, Chen et al. (2020) consideran que las áreas de fabricación de la empresa productora de envases de cartón deben realizar optimización en diferentes procesos con la automatización de ciertos elementos del proceso productivo, con miras en adaptarse a las exigencias propias del mercado. Por su parte Ávila-Eustaquio y De La Cruz-Centeno (2022) refieren que es fundamental garantizar un flujo de materiales en función de la máquina considerada como restrictiva tomando en cuenta la fecha de entrega de un pedido.

La implementación de algoritmos de secuenciación ha demostrado una mejora significativa en la reducción de tiempos de alistamiento en una empresa cartonera, especialmente en el proceso de impresión. Ávila-Eustaquio y De La Cruz-Centeno (2022) aplicaron un modelo lineal para la programación de operaciones en la fabricación de cajas de cartón, maximizando la eficiencia en los cuellos de botella durante los procesos de impresión y troquelado. Utilizaron heurísticas para programar las tareas hacia adelante o hacia atrás, según la capacidad productiva y la carga de trabajo, obteniendo resultados satisfactorios que coinciden con los hallazgos de este estudio. De manera similar, Mendoza et al. (2020) utilizaron un algoritmo de Kaufmann, un tipo de algoritmo de recorrido simulado, para optimizar un proceso productivo. Aunque lograron demostrar su aplicabilidad, señalaron que este método y otros similares tienen como inconveniente que solo proporcionan un óptimo local, el cual puede estar alejado del óptimo global. Esto coincide con lo observado en el presente estudio, ya que aun cuando el algoritmo de recorrido simulado mostró cierta mejora, fue el de menor desempeño.

La efectividad de los algoritmos secuenciadores en la optimización de procesos y específicamente del recocido simulado, también fue reportado por Pérez Domínguez et al. (2023) quienes destacaron su versatilidad, eficiencia y facilidad de uso. Esto también fue destacado por Wilches Visbal y Martins Da Costa (2019) al desarrollar el algoritmo de secuenciación en Matlab. De igual forma Mejía Viteri et al., (2022) demostraron que el algoritmo de recocido simulado es aplicable a la optimización de los costos de los vehículos usados, y las variables asociadas con la distancia recorrida por las rutas. De lo anterior se deduce que los resultados obtenidos son consistentes con los de otros investigadores. Por su parte, el uso de algoritmo de búsqueda tabú, el cual fue el que mejor desempeño mostró en la optimización de los procesos llevados a cabo en la impresora S Y S según los resultados obtenidos, también ha sido investigado y corroborado por otros autores. Aguirre Morillo y Toapanta Barreiro (2021) al aplicar este algoritmo al estudio de redes eléctricas, concluyeron que tiene un gran desempeño y que en él se pueden incluir todos los elementos de un sistema real, permitiendo obtener soluciones de alta calidad.

Como se observó, el algoritmo de búsqueda tabú se puede utilizar para optimizar el desempeño del proceso estudiado, lo que es concordante con otras investigaciones donde se ha implementado dicho modelo en diferentes ámbitos. Chávez-Bosquez et al. (2015) aplicaron una variante del algoritmo para la optimización y generación de horarios escolares concluyendo que es eficiente ya que se obtienen mejores resultados comparado con otras alternativas. Este tipo de algoritmo secuencial también fue aplicado para la optimización de la selección del calibre de conductores eléctricos por Montoya et al. (2018) quienes también coinciden en que se alcanzan soluciones de mejor calidad al ser comparadas con las reportadas en la literatura especializada. Igualmente, Romero-Conrado et al. (2020) demostraron que el algoritmo de búsqueda tabú es aplicable a la programación de horarios escolares, con soluciones óptimas al ser comparadas con cálculos manuales. Aun cuando no se constató el uso de los algoritmos de secuenciación para optimizar procesos en la industria cartonera por parte de otras investigaciones, se ha demostrado su utilidad en otras industrias y áreas de investigación.

Conclusiones

La aplicación de los algoritmos de secuenciación requiere de un conocimiento muy específico en lenguaje de programación y teoría en investigación de operaciones, pero sus resultados aseguran el manejo adecuado de los recursos físicos y humanos disponibles. Como resultado se obtuvo un ahorro de 658,2 horas hombre respecto a la situación inicial y de 1552 horas hombre después del uso de Lean Manufacturing en una sola máquina. Si se hubiera

dado alcance con las otras 3 impresoras los resultados serían más impactantes, pero por falta de datos se planteó desde el comienzo solo analizar una impresora.

La efectividad de los algoritmos secuenciadores en la optimización del proceso de impresión de la industria cartonera, al igual que se observó para otras empresas, queda demostrada con la mejora de los tiempos de proceso y la disminución de horas hombre de trabajo. Solo queda profundizar en su aplicación y compararlo con otras técnicas como la simulación con softwares especializados como el Flexsim, el cual ha demostrado ser útil en diferentes aplicaciones industriales.

Referencias Bibliográficas

Aguirre Morillo, G. J., & Toapanta Barreiro, E. G. (2021). *Aplicación de algoritmos genéticos para la ubicación óptima de condensadores en el alimentador primario de distribución tipo radial*. Tesis de grado. Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC).

Alsheddy, A., Voudouris, C., Tsang, E. P. K., & Alhindi, A. (2018). Guided Local Search. In: Handbook of Heuristics. Ed. Martí, R. Pardalos, P., Resende, M. Cham: Springer, 261-297.

Ávila-Eustaquio, M. N., De La Cruz-Centeno, M. I. (2022). *Propuesta de mejora en el área de producción aplicando programación lineal, MRP y distribución de planta para reducir costos operativos en una fábrica de cartón, Trujillo, 2020*. Tesis de grado. Trujillo: Universidad Privada del Norte.

Cano Castillo, C. V., Escobar Torres, L. D. (2018). *Caracterización teórica y su relación en la implementación de herramientas Lean Manufacturing en procesos de manufactura*. Tesis de grado. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Caro Dávila, N. X., Ponce de León Vargas, C. S. O. (2021). *La relación de la innovación tecnológica y el desempeño exportador de las empresas agroexportadoras peruanas del sector frutas frescas durante el periodo 2012-2020*. Tesis de grado. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Chávez-Bósquez, O., Pozos-Parra, P., Gómez-Ramos, J. L. (2015). Búsqueda tabú con criterio de aspiración probabilístico aplicada a la generación de horarios escolares. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 22(1), 153–177.

Chen, S., Brahma, S., Mackay, J., Cao, C., Aliakbarian, B. (2020). The role of smart packaging system in food supply chain. *Journal of Food Science*, 85(3), 517-525.

Davalos Román, E. J., Luna Usquiano, E. A., Miñan Olivos, G. S., Valderrama Puscan, M. W., Rivera Ramírez, Y. V. (2023). Single Minute Exchange of Die (SMED) to improve productivity in the industrial sector. A systematic review of the literature from 2012 to 2022. *LACCEI*, 1(8).

Egas-García, Bautista-Romero, M. A., Peralta-Fonseca, M. A. (2022). Optimización del proceso de producción de maquinarias y equipos industriales. *Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas*, 6(2), 76-85.

Guilmeau, T., Chouzenoux, E., Elvira, V. (2021). *Simulated annealing: A review and a new scheme*. 2021 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP). Rio de Janeiro: IEEE, 101-105.

Hernández-Vázquez, J. O., Hernández-González, S., Jiménez-García, J. A., Hernández-Ripalda, M. D., Hernández-Vázquez, J. I. (2019). Enfoque híbrido metaheurístico AG-RS para el problema de asignación del buffer que minimiza el inventario en proceso en líneas de producción abiertas en serie. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 16(4), 447–458.

Jiménez-León, F. G. (2020). Administración de operaciones: análisis de las estrategias de operaciones en las empresas como elemento clave para la competitividad. *Polo del Conocimiento*, 5(10), 551-559.

- Malpartida Gutiérrez, J. N. (2020). Importancia del uso de las herramientas Lean Manufacturing en las operaciones de la industria del plástico en Lima. *Llamkasun*, 1(2), 77–89.
- Manzano Rodríguez, J. E., Ramos Alfonso, Y. (2023). Incremento de la productividad en Metrológica Instrumentes S.A. mediante herramientas Lean Manufacturing. *Ingeniería Industrial*, 44(3), 147-162.
- Martí, R., Martínez-Gavara, A., Glover, F. (2023). Tabu Search. In: Discrete Diversity and Dispersion Maximization. Ed. Martí, R., Martínez-Gavara, A. Cham: Springer International Publishing, 137-149.
- Mathiyazhagan, K., Gnanavelbabu, A., Naveen Kumar, N., Agarwal, V. (2022). A framework for implementing sustainable lean manufacturing in the electrical and electronics component manufacturing industry: An emerging economies country perspective. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130169.
- Mejía Viteri, J. T., Gonzales Valero, M. I., Fernández Torres, A. del R., Crespo Torres, N. M. (2022). Seguridad contra ataques DDoS en los entornos SDN con Inteligencia Artificial. *Magazine de las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación*, 7(3), 105–127.
- Mendoza A., C. A., Pérez, G. E., López, C. A. (2020). Estudio comparativo entre el algoritmo búsqueda de lobos y otras metaheurísticas en el problema de una máquina con tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. *Ingeniería e Innovación*, 8(1).
- Mera Silva, A. O., Torres Tandazo, J. M., Conforme Montesdeoca, J. V. (2024). Aplicación de la logística inversa y su incidencia en la disminución de desechos y desperdicios en el supermercado ubicado en la av. Jacinto Cortez Jharrya, Santo Domingo 2023. *Revista Social Fronteriza*, 4(2), e42163.
- Mehta, V. B., Dave, P. Y. (2020). Impact of 5S and lean manufacturing techniques in various organisations to enhance the productivity. *International Journal of Advances in Engineering and Management*, 2(1), 421-436.
- Montoya G., O. D., Grajales, A., & Hincapié I., R. A. (2018). Selección óptima de conductores en sistemas de distribución empleando el algoritmo búsqueda tabú. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 26(2), 283-295.
- Ñaupari Huatuco, D. Z., Molina Rodríguez, Y. P., Vidal Suarez, K. W., Aquino Toccas, G. J. (2022). Reconfiguración de sistemas de distribución con algoritmo de Búsqueda Tabú modificado. *Tecnia*, 32(1), 63-69.
- Pardalos, P. M., Mavridou, T. D. (2024). Simulated annealing. In: Encyclopedia of Optimization. Ed. Floudas, C. A., Pardalos, P. M. 2nd ed. Cham: Springer International Publishing, 1-3.
- Peña Guarín, G., Castro Rojas, M. L., Álvarez Álvarez, M. J. (2020). Modelo de gestión del conocimiento para pymes, basado en el sistema de gestión de la calidad y la gestión documental. *SIGNOS-Investigación en Sistemas de Gestión*, 12(2), 127-147.
- Pérez Domínguez, L., Martinez Gomez, E. A., Luviano Cruz, D., Ramírez-Ochoa, D. D., & Landeros-Martínez, L. L. (2023). Algoritmo PSO con extensión de TOPSIS para la valoración de aceites esenciales. Instituto de Ingeniería y Tecnología.
- Ponce Telles, C. I., Gómez Romero, J. G. I. (2022). Estilos de liderazgo y aprendizaje organizacional: un estudio de caso. *Ibero-American Journal of Economics & Business Research*, 2(1), 18–32.
- Puertas Aragón, C. N., Lozada Rivera, D. E. (2024). Incremento de la productividad en una empresa ganadera láctea de la región Arequipa, Perú, mediante la aplicación de lean manufacturing. *Ingeniería Industrial*, 35-58.
- Quishpe, F. J. (2021). Análisis y optimización en la producción de envases de cartón, empleando el Value Stream Mapping. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(3), 536-542.
- Rodríguez Cardo, I. A. (2022). Gestión laboral algorítmica y poder de dirección: ¿hacia una participación de los trabajadores más intensa? *Revista Jurídica de Asturias*, (45).

Romero-Conrado, A., Coronado-Hernández, J., Visbal-Acevedo, R. (2020). Aplicación de la Búsqueda Tabú en la resolución del problema capacitado de lotificación en sistemas de producción multinivel: Un estado del arte. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 2(1), 1-6.

Salazar Otálora, G. E., Manrique Joya, G. M., Cuy Rojas, A. L. (2023). Capacidades logísticas como factores determinantes para la internacionalización de las pymes: una revisión sistemática de literatura. *Revista CEA*, 9(19), e2126.

Tan, J. S., Goh, S. L., Kendall, G., Sabar, N. R. (2021). A survey of the state-of-the-art of optimisation methodologies in school timetabling problems. *Expert Systems with Applications*, 165, 113943.

Vargas Crisóstomo, E. L., Camero Jiménez, J. W. (2021). Aplicación del Lean Manufacturing (5s y Kaizen) para el incremento de la productividad en el área de producción de adhesivos acuosos de una empresa manufacturera. *Industrial Data*, 24(2), 249-271.

Veliz Camargo, V. M., & Maytan Huamanchao, R. G. (2024). *Aplicación de modelo numérico para el control de flujo de detritos en la quebrada Oyón, distrito de Villa Rica, provincia de Oxapampa, departamento de Pasco*. Tesis de grado. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Wilches Visbal, J. H., Martins Da Costa, A. (2019). Algoritmo de recocido simulado generalizado para Matlab. *Ingeniería y Ciencia*, 15(30), 117–140.

Editor Asociado: Alfredo Leal

Instituto Profesional IACC.

alfredojleal@gmail.com

Región Metropolitana, Chile



REVISTA TECNICA

DE LA
FACULTAD DE
INGENIERIA
UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

Volumen 48. Año 2025, Edición continua_____

*Esta revista fue editada en formato digital y
publicada en enero 2025, por el **Fondo
Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia.
Maracaibo-Venezuela***

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
www.produccioncientificaluz.org