

**Ciencia Latina**  
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), noviembre-diciembre 2024,  
Volumen 8, Número 6.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i6](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6)

**MODELOS Y MÉTODOS DE SOLUCIÓN EN EL  
BALANCEO DE LÍNEAS DE PRODUCCIÓN  
APLICADOS EN LAS ORGANIZACIONES: ANÁLISIS  
DE LITERATURA BIBLIOMÉTRICA ENFOCADO AL  
MÉTODO DE ASIGNACIÓN**

**MODELS AND SOLUTION METHODS IN PRODUCTION  
LINE BALANCING APPLIED IN ORGANIZATIONS: A  
BIBLIOMETRIC LITERATURE ANALYSIS FOCUSED ON  
THE ASSIGNMENT METHOD.**

**Ivan Araoz Baltazar**

Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto Tecnológico de Tehuacan Universidad  
Nacional, Mexico

**Iniria Guevara Ramírez**

Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto Tecnológico de Tehuacan Universidad  
Nacional, Mexico

**Oscar Del Angel Medina**

Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto Tecnológico de Tehuacan Universidad  
Nacional, Mexico

**Jessica Cruz Manzo**

Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto Tecnológico de Tehuacan Universidad  
Nacional, Mexico

**Israel Martínez Zárate**

Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto Tecnológico de Tehuacan Universidad  
Nacional, Mexico

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i6.15132](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15132)

## Modelos y Métodos de Solución en el Balanceo de Líneas de Producción Aplicados en las Organizaciones: Análisis de Literatura Bibliométrica Enfocado al Método de Asignación

**Ivan Araoz Baltazar<sup>1</sup>**[ivan.ab@tehuacan.tecnm.mx](mailto:ivan.ab@tehuacan.tecnm.mx)<https://orcid.org/0000-0003-0394-2979>Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto  
Tecnologico de Tehuacan Universidad Nacional  
Mexico**Iniria Guevara Ramírez**[iniria.gr@tehuacan.tecnm.mx](mailto:iniria.gr@tehuacan.tecnm.mx)<https://orcid.org/0000-0002-6390-1661>Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto  
Tecnologico de Tehuacan Universidad Nacional  
Mexico**Oscar Del Angel Medina**[oscar.delangel2106@gmail.com](mailto:oscar.delangel2106@gmail.com)<https://orcid.org/0009-0003-0852-5143>Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto  
Tecnologico de Tehuacan Universidad Nacional  
Mexico**Jessica Cruz Manzo**[jessica.cm@tehuacan.tecnm.mx](mailto:jessica.cm@tehuacan.tecnm.mx)<https://orcid.org/0000-0001-9872-1794>Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto  
Tecnologico de Tehuacan Universidad Nacional  
Mexico**Israel Martínez Zárate**[israel.mz@tehuacan.tecnm.mx](mailto:israel.mz@tehuacan.tecnm.mx)<https://orcid.org/0000-0002-7896-784X>Tecnologico Nacional de Mexico / Instituto  
Tecnologico de Tehuacan Universidad Nacional  
Mexico

### RESUMEN

Este estudio analiza la evolución de los métodos de balanceo de líneas de producción (ABLP) en la industria manufacturera, combinando un análisis bibliométrico con una revisión de la literatura. Desde enfoques tradicionales, como heurísticas y programación lineal, los métodos han avanzado hacia algoritmos genéticos, optimización multiobjetivo e inteligencia artificial, integrando estas técnicas para facilitar su implementación. Se examina la creciente adopción de principios de la Industria 5.0, como la colaboración humano-robot, y su impacto en el modelado del balanceo de líneas. En sectores donde la mano de obra humana sigue siendo crucial, los métodos de “asignación” ofrecen soluciones específicas, considerando las competencias individuales de los operarios. Además, se subraya un énfasis en la sostenibilidad, incluyendo el reciclaje mediante líneas de desensamble, la reducción del impacto ambiental y la mejora de las condiciones ergonómicas. A pesar de los avances, persisten retos significativos, como la integración de restricciones del mundo real en modelos matemáticos y la gestión de la dinámica natural en las líneas de desensamble. Los hallazgos destacan la necesidad de seguir innovando en técnicas de balanceo que respondan a las demandas de la manufactura moderna, manteniendo el compromiso con la sostenibilidad y la asignación de tareas de acuerdo con las competencias de cada trabajador.

**Palabras clave:** balanceo de línea, asignación, bibliometrix

---

<sup>1</sup> Autor principal.

Correspondencia: [ivan.ab@tehuacan.tecnm.mx](mailto:ivan.ab@tehuacan.tecnm.mx)

# Models and Solution Methods in Production Line Balancing Applied in Organizations: A Bibliometric Literature Analysis Focused on the Assignment Method.

## ABSTRACT

This study analyzes the evolution of assembly line balancing (ALB) methods in the manufacturing industry, combining a bibliometric analysis with a literature review. From traditional approaches, such as heuristics and linear programming, the methods have advanced toward genetic algorithms, multi-objective optimization, and artificial intelligence, integrating these techniques to facilitate their implementation. The study examines the growing adoption of Industry 5.0 principles, such as human-robot collaboration, and their impact on assembly line balancing modeling. In sectors where human labor remains crucial, "assignment" methods offer tailored solutions, considering individual workers' skills. Additionally, the study highlights an emphasis on sustainability, including recycling through disassembly lines, reducing environmental impact, and improving ergonomic conditions. Despite advancements, significant challenges persist, such as integrating real-world constraints into mathematical models and managing the inherent dynamics in disassembly lines. The findings underscore the need to continue innovating balancing techniques that meet the demands of modern manufacturing while maintaining a commitment to sustainability and task allocation based on individual worker competencies.

**Keywords:** line balancing, assignment, bibliometrix

*Artículo recibido 12 octubre 2024  
Aceptado para publicación: 15 noviembre 2024*



## INTRODUCCIÓN

Los modelos de balanceo de líneas (ABLP) distribuyen la carga total de trabajo para la fabricación de cualquier producto entre los puestos de trabajo a lo largo de la línea (Becker & Scholl, 2004). Estos modelos se aplican en la industria manufacturera para minimizar el tiempo ocioso en las estaciones de trabajo, es decir, aprovechar al máximo los recursos humanos, herramientas y maquinaria. Como resultado, se logra un mejor uso de recursos como la energía eléctrica, combustibles y costos de mantenimiento.

Este artículo ofrece un estudio bibliométrico y un análisis de la literatura, cuyo propósito es identificar los distintos métodos de solución empleados en cada modelo de balanceo de líneas de producción. Este conocimiento es esencial para reconocer principios de solución eficaces y adaptables, aplicables a diversos contextos y problemas (Boysen et al., 2021).

La manufactura tradicional se centra en la producción y ensamblaje de productos nuevos. La primera formulación analítica del problema de balanceo de líneas de ensamblaje (ALB) fue presentada por Helgeson en 1954 y posteriormente por Salveson en 1955 (Ghosh & Gagnon, 1989). Sin embargo, desde 2016, los temas de “economía circular” y “desarrollo sostenible” han sido promovidos a nivel global, lo que ha generado un aumento en las investigaciones relacionadas con sistemas de producción orientados al reciclaje, la reutilización, la recuperación o la eliminación de productos al final de su vida útil (Pan & Li, 2016). Este enfoque plantea nuevos desafíos para la gestión de la producción, siendo uno de los más relevantes la adaptación de los métodos de balanceo de líneas, conocidas como líneas de desensamble (DLBP). Estas líneas se utilizan ampliamente para dismantelar productos, reduciendo así la ocupación de recursos útiles y la contaminación ambiental (Liang et al., 2020).

A diferencia del ensamblaje, el desensamble parcial en la industria actual busca maximizar los beneficios o minimizar los costos, justificando la remanufactura de estos productos. Además, este proceso introduce relaciones de precedencia adicionales entre las tareas debido a restricciones físicas inherentes (Altekin et al., 2008).

El principal reto para las organizaciones es desarrollar un modelo matemático de balanceo de líneas que contemple las características específicas de las líneas de ensamblaje o desensamble, incluyendo la distribución secuencial de las estaciones de trabajo y la asignación de tareas sin violar las relaciones de



precedencia (Lalaoui & Afia, 2019). También es esencial considerar la interacción entre operarios, maquinaria y robots, así como otras particularidades del sistema de producción, para seleccionar el método de solución más adecuado y garantizar que este modelo tenga implicaciones sostenibles. Dicho de otra manera:

- El balanceo de líneas debe optimizar la utilización de energía invertida en la producción.
- Los trabajadores deben ser asignados a estaciones de trabajo de manera que puedan realizar todas las tareas según su cualificación, lo cual mejora su entorno laboral y, en algunos casos, genera beneficios sociales significativos, incluso aceptando pequeñas desviaciones del óptimo económico (Boysen et al., 2021; Trost et al., 2022).
- Finalmente, el modelo debe contribuir a la reducción de costos y a un mayor beneficio global.

### **Revisión de Literatura**

La revisión de literatura enfocada en el balanceo de líneas proporcionó información clave que resultó fundamental para contextualizar y orientar los objetivos planteados en este artículo. Como punto de partida, identificamos los problemas que los autores más influyentes en el ámbito buscan resolver. Esto fue especialmente relevante para comprender en qué aspectos concentran sus esfuerzos los investigadores, permitiéndonos enfocar nuestras futuras investigaciones y profundizar en los sectores relevantes a nivel local. Para muchas empresas, identificar y definir un problema, sus características y criterios suele ser más complejo que resolver el problema en sí (Dolgui & Proth, 2010).

Entre los hallazgos destacados, presentados en la Tabla 1, tenemos que permanece el objetivo principal de los métodos de balanceo de línea como la reducción de costos y la optimización en la asignación de tareas, con el objetivo de determinar el número mínimo de estaciones de trabajo necesarias para cumplir con los requisitos de producción establecidos (Talbot et al., 1986). Incluso pequeñas mejoras en estos aspectos pueden traducirse en ahorros económicos significativos (Pilati et al., 2021).

Otro punto relevante es la importancia de no solo priorizar la eficiencia y productividad de los colaboradores, sino también mejorar sus condiciones laborales. Para lograr dicha eficiencia, es crucial incorporar consideraciones ergonómicas al analizar el balanceo de líneas, especialmente en entornos donde la proporción de trabajo manual es elevada (Otto & Scholl, 2011). Aunque las líneas de ensamblaje robóticas han demostrado ser más eficientes que las manuales, su desempeño depende



estrictamente de la calidad de su balance, sin enfrentarse a los desafíos asociados con factores humanos (Levitin et al., 2002). Por su parte, las líneas híbridas, que combinan humanos y robots colaborativos, representan un paso evolutivo significativo en la fabricación, al demostrar alta eficiencia. Sin embargo, estas líneas híbridas siguen planteando grandes retos en términos de balanceo de líneas (Mura & Dini, 2019). En este contexto, la asignación de tareas en base a las competencias de cada trabajador se vuelve trascendental para eficientar la línea de producción, a esto se le denomina Problema de Asignación de Trabajadores y Balanceo de Líneas de Ensamblaje (ALWABP, por sus siglas en inglés) donde las asignaciones de tareas como de trabajadores a estaciones de trabajo se realizan de manera paralela (Katirae et al., 2022b).

Finalmente, se observa un claro repunte en la remanufactura, la cual no solo contribuye económicamente, sino también al cuidado del medio ambiente. Sin embargo, este enfoque plantea desafíos importantes en la optimización del balanceo de líneas, debido a la naturaleza dinámica del desensamble. Las variaciones en la entrada de productos desechados, la demanda y los ingresos requieren ajustes constantes, lo que demanda sistemas flexibles y adaptativos (Altekin et al., 2008c).

**Tabla 1.** Principales problemas abordados y principales objetivos de la literatura

Autor	Objetivo	Problema que aborda el autor
(Dolgui & Proth, 2010)	Implementación de soluciones eficientes y flexibles adaptadas a las realidades y desafíos de la industria moderna.	Definir el problema en sí, imposibilidad de aplicar en contextos reales las teorías, la complejidad de los modelos no son aceptados por las empresas
(Altekin et al., 2008)	Asignación óptima de tareas a estaciones, Ajuste dinámico del tiempo de ciclo y número de estaciones	Las líneas actuales de desensamble consisten en una única estación donde se realiza manualmente el desensamble
(Talbot et al., 1986)	Proporcionar guías para elegir las reglas heurísticas más adecuadas dependiendo del objetivo	Es difícil agrupar las tareas de trabajo que deben realizarse en "work packages" o estaciones de trabajo, de manera que se logre un nivel deseado de desempeño
(Lee et al., 2001)	Reducir el impacto en los criterios tradicionales como tiempo de ciclo y número de estaciones, manteniendo o mejorando la calidad de las soluciones.	Dificultad para ensamblar productos de gran tamaño, como camiones y autobuses.
(Levitin et al., 2002)	Desarrollar un método eficiente basado en algoritmos genéticos	Distribución ineficiente de tareas entre robots especializados
(Dimopoulos & Zalzal, 2000)	Examinar y presentar desarrollos recientes en el uso de algoritmos evolutivos para la optimización de manufactura.	No existe un algoritmo de tiempo polinómico que pueda resolver problemas combinatorios, se emplean métodos heurísticos para resolverlos
(Kalayci & Gupta, 2013)	Desarrollar un algoritmo eficiente para resolver el problema de balanceo de líneas de desensamble dependientes de secuencia (SDDLBP)	La remoción tardía de componentes peligrosos y de alta demanda.
(Otto & Scholl, 2011)	Integrar métodos de estimación de riesgos ergonómicos en modelos de balanceo de líneas.	Condiciones de trabajo desfavorables o la ergonomía deficiente en el lugar de trabajo

(Gonçalves & Almeida, 2002)	Diseñar un método híbrido que combine algoritmos genéticos y heurísticas	Los métodos de balanceo de línea organizan las estaciones de trabajo en línea recta sin flexibilidad
(Kalayci et al., 2014)	Resolver el problema de balanceo de líneas de desensamble dependientes de secuencia	No se prioriza la remoción de componentes de alta demanda y de componentes peligrosos.
(Kalayci & Gupta, 2013)	Resolver el problema de balanceo de líneas de desensamble dependientes de secuencia	Realiza una propuesta de un modelo teórico general y propuesta de solución
(Gamberini et al., 2005)	Desarrollar un enfoque multiobjetivo	Alta reasignación de tareas genera costos asociados como capacitación, garantía de calidad y cambios en equipos.
(Ding et al., 2010)	Optimización de la demanda y recuperación de partes reutilizables.	La corta vida útil de los productos, las tecnologías emergentes innovaciones y un aumento espectacular del consumo genera un problema alarmante de gestión de residuos
(Avikal et al., 2013)	Optimizar el proceso de desensamble desde las perspectivas económica, técnica, ambiental y social.	Faltan métodos para extraer partes, subconjuntos y materiales valiosos de productos desechados mediante una serie de operaciones estructuradas.
(Baykasoglu, 2006)	Maximizar el índice de suavidad (Smoothness Index, SI) y el rendimiento de la línea (minimización del número de estaciones).	Desorganización en las tareas de trabajo de estaciones de manera que no se alcanza el nivel de rendimiento requerido.
(Guo et al., 2023)	Incorporar escenarios de mantenimiento preventivo en el problema de balanceo de líneas de desensamble parciales (PDLBP)	No se prevén fallas inevitables de máquinas y escenarios de mantenimiento preventivo
(Zhang et al., 2023)	Tiempos ociosos en las estaciones.	Alto consumo de energía y costos
(Liang et al., 2020)	Resolver el problema de balanceo de líneas de desensamble de dos lados con restricciones complejas de ejecución (TDLBP-CECs)	Contaminación ambiental de productos al final de su vida útil como electrónicos de consumo, electrodomésticos y vehículos
(Mura & Dini, 2019)	Lograr sistemas de producción más dinámicos	La industria manufacturera está pasando de la producción en masa a la personalización en masa
(J. Liu et al., 2019)	Optimización de las celdas robóticas y de las líneas de desensamble robótico, mejorando así la eficiencia del desensamble	Priorizar las ganancias sin considerar adecuadamente la conservación de materiales y la emisión de contaminantes, el desensamble manual tiene desventajas como baja eficiencia y altos costos laborales.
(Chiang et al., 2007)	Introducir y formalizar el problema de balanceo de múltiples líneas en U (MULB)	Múltiples líneas idénticas, así como con múltiples líneas de diferentes tamaños
(Abdous, Delorme, Battini, Sgarbossa, et al., 2022)	Incorporar la ergonomía desde la fase de diseño de líneas de ensamblaje	Los trabajadores siguen enfrentándose a riesgos de trastornos musculoesqueléticos y lesiones asociadas con sus actividades laborales.
(Bilir et al., 2023)	Minimizar la diferencia de carga de trabajo entre los trabajadores de la línea de montaje durante un límite de tiempo	Dificultad para asignar tareas de acuerdo con las competencias de cada trabajador dada una moda cambiante
(Katirae et al., 2022)	Minimizar el tiempo de ciclo y el número de tareas reasignadas según competencia de los trabajadores	Los trabajadores no necesariamente tienen el mismo desempeño debido a sus diferencias en edad, género, habilidades y atributos físicos

**Fuente:** Elaboración propia con la base Scopus y WOS.



Como complemento de la revisión de literatura, en la Tabla 2 se presentan los principales tipos de líneas de producción o ensamblaje estudiados por los autores más destacados, junto con los modelos de solución empleados para abordar los problemas identificados en la tabla de aportaciones anterior (Tabla 1). El análisis abarca artículos publicados desde 1986 hasta 2024, con el objetivo de identificar la evolución de las líneas de balanceo, desde los métodos tradicionales basados en precedencias y algoritmos heurísticos, hasta soluciones avanzadas como algoritmos genéticos y otras de inteligencia artificial.

El estudio también explora estaciones bilaterales o de dos lados, algoritmos de enjambre de partículas y, más recientemente, la incorporación de redes neuronales como métodos de aprendizaje automático. Este ejercicio de revisión nos introduce a la nueva realidad de las técnicas del balanceo de líneas, el enfoque en la Industria 5.0, que pone al ser humano en el centro como evolución de la Industria 4.0, con énfasis en sistemas híbridos de fabricación con robots colaborativos (Abdous, Delorme, Battini, & Berger-Douce, 2022). Sin embargo, muchas empresas todavía dependen en gran medida de las operaciones manuales, lo que hace que la habilidad y competencia de los trabajadores sean factores cruciales, especialmente en industrias como la confección (Bilir et al., 2023).

**Tabla 2.** Líneas de ensamble y modelos de solución de la literatura

AUTOR	Sector	Tipo de línea	Modelo de solución
(Talbot et al., 1986)	No se menciona uno específico	Líneas de ensamblaje tradicionales	26 reglas heurísticas de decisión, Reglas heurísticas con retroceso (backtracking)
(Dimopoulos & Zalzalá, 2000)	Manufactura	Líneas simples y líneas para modelos mixtos	Algoritmos evolutivos (EAs), Enfoques multiobjetivo
(Lee et al., 2001)	Fabricación de productos de gran tamaño	Líneas de ensamblaje de dos lados (two-sided assembly lines),	Desarrollo de un procedimiento heurístico de asignación grupal, que asigna grupos de tareas en lugar de tareas individuales.
(Gonçalves & Almeida, 2002)	Manufactura	Líneas de ensamblaje simples, (Simple Assembly Line Balancing Problem, SALBP-1).	Algoritmo genético híbrido, claves aleatorias (random keys), procedimientos orientados a estaciones (station-oriented procedures).
(Levitin et al., 2002)	Líneas de ensamblaje automatizadas y robóticas	Líneas de ensamblaje robóticas (Robotic Assembly Lines), sistemas de ensamblaje flexible (Flexible Assembly Systems, FAS)	Algoritmo Genético (GA), procedimiento de mejora local (hill climbing) para optimizar asignaciones, Asignación recursiva, Asignación consecutiva
(Gamberini et al., 2005)	Manufactura manual	Líneas de ensamblaje estocásticas de modelo único (single-model stochastic assembly lines)	Técnica para la Preferencia de Orden por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS), Heurística de Kottas y Lau, actor de similitud (similarity factor)
(Baykasoglu, 2006)	Manufactura	Líneas de ensamblaje rectas (straight-line), línea de ensamblaje en forma de U (U-shaped).	Algoritmo de Recocido Simulado Multiobjetivo (SA), reglas de asignación de tareas múltiples, programación por metas
(Chiang et al., 2007)	Manufactura Just-In-Time (JIT)	Líneas en forma de U múltiples (Multiple U-Lines), utilizadas en ambientes de producción Just-In-Time (JIT)	Programación lineal entera mixta (MILP), Algoritmo Branch-and-Bound

(Altekin et al., 2008)	Desensamble (remanufacturing)	Líneas de desensamble parciales orientadas al beneficio (profit-oriented partial disassembly lines)	Programación entera mixta, Relajación de programación lineal.
(Dolgui & Proth, 2010)	Manufactura	Líneas de Ensamblaje en Forma de "U"; Brigadas en Cubo (Bucket Brigades), Líneas de Ensamblaje Mixtas	Genetic algorithms, Simulated Annealing., Dynamic programming, polinomios de Tchebycheff
(Ding et al., 2010)	Reciclaje y Remanufactura	Líneas de desensamble y determinísticas de modelo único (single-model deterministic disassembly lines)	Algoritmo Multiobjetivo Basado en Colonia de Hormigas (MOACO), heurísticas basadas en prioridades, filtro de soluciones de Pareto
(Otto & Scholl, 2011)	Manufactura	Líneas de ensamblaje tradicionales	Estimación de riesgos ergonómicos no lineales, SALOME: Procedimiento exacto para minimizar el número de estaciones, Simulated Annealing (SA)
(Kalayci & Gupta, 2013)	Desensamble (remanufacturing)	Líneas de desensamble dependientes de secuencia (Sequence-Dependent Disassembly Lines)	Algoritmo de Colonia de Abejas Artificial (ABC) vs Optimización por enjambre de partículas (PSO), búsqueda tabú (TS), y algoritmos genéticos (GA).
(Kalayci & Gupta, 2013)	Reciclaje y Remanufactura	Líneas de desensamble y dependientes de secuencia (Sequence-Dependent Disassembly Lines)	Algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO), operadores de mutación basados en vecindarios (SWAP e INSERT), función multiobjetivo
(Avikal et al., 2013)	Reciclaje y Remanufactura	Líneas de desensamble y determinísticas de modelo único (Single-Model Deterministic Disassembly Lines)	Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process difuso), Método PROMETHEE II (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), Heurística de asignación
(Kalayci et al., 2014)	Reciclaje y Remanufactura	Líneas de desensamble y dependientes de secuencia (Sequence-Dependent Disassembly Lines)	Algoritmo Genético Híbrido (HGA), búsqueda en vecindarios variables (Variable Neighborhood Search, VNS). optimización multiobjetivo
(Mura & Dini, 2019)	Manufactura	Líneas de ensamblaje colaborativas con humanos y robots	Algoritmo genético (GA), Representación en cromosomas con dos subcomponentes, Función de fitness basada en una suma ponderada de los objetivos.
(J. Liu et al., 2019)	Reciclaje y Remanufactura	Líneas de desensamble robóticas (Robotic Disassembly Lines) para productos al final de su vida útil (End-of-Life, EOL)	Algoritmo de abejas discretas mejorado (IDBA), Proceso analítico en red (ANP)
(Sikora & Weckenborg, 2022)	Manufactura	Líneas de ensamblaje colaborativas con humanos y robots colaborativos (cobots)	Descomposición de Benders, Evaluación computacional extensiva
(Liang et al., 2020)	Reciclaje y Remanufactura	Líneas de desensamblaje de dos lados (two-sided disassembly lines)	Modelo de programación lineal entera mixta (MILP), Algoritmo de recocido simulado multiobjetivo de doble individuo (DMOSA),
(Abdous et al., 2022)	Manufactura	Líneas de ensamblaje simples (Simple Assembly Line Balancing Problem, SALBP), con enfoque en la ergonomía	Modelo de programación lineal entera mixta (MILP), Algoritmo exacto de búsqueda dicotómica iterativa (IDS)
(Katirae et al., 2022)	Manufactura	Modelo de programación lineal con bi-objetivo	Modelo de programación lineal con bi-objetivo
(Guo et al., 2023)	Reciclaje y Remanufactura	Líneas de desensamble parciales (Partial Disassembly Lines, PDL)	Modelo matemático difuso multiobjetivo, Algoritmo híbrido mejorado de colonia de abejas artificiales (ABC), Búsqueda adaptativa en vecindarios, Estrategia de aprendizaje global híbrido
(Qin et al., 2023)	Reciclaje y Remanufactura	Líneas de desensamble paralelas	Modelo de balanceo para líneas de desensamble paralelas, Algoritmo de enjambre de salpas (SSA), CPLEX: Validación matemática del modelo, Algoritmo genético (GA), Enfoque de descomposición con optimización de cuadrículas (CDG). Búsqueda aleatoria (RS)

(Zhang et al., 2023)	Manufactura orientada a la sostenibilidad	la	Líneas de ensamblaje mixtas con múltiples trabajadores por estación (Mixed-Model Multi-Manned Assembly Lines),	Modelo de programación lineal entera mixta (MILP), Algoritmo de coevolución multiobjetivo, Representación de dos capas, Estrategia de doble cooperación
(Bilir et al., 2023)	Industria de confección	de la	Modelo matemático con asignación de tareas basado en competencias del trabajador	Modelo matemático con asignación de tareas basado en competencias del trabajador

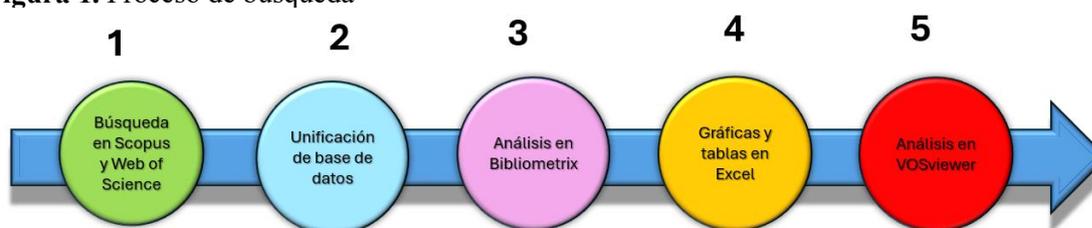
Fuente: Elaboración propia con la base Scopus y WOS.

## METODOLOGÍA

Para la elaboración del presente artículo, se realizó un estudio bibliométrico de la literatura enfocada en el balanceo de líneas, lo que permitió explorar y analizar datos científicos disponibles en las principales bases de datos académicas. Este análisis nos ayudó a identificar la evolución del tema a lo largo del tiempo y detectar temas emergentes en el campo (Donthu et al., 2021).

La búsqueda se llevó a cabo en las bases de datos Scopus y Web of Science, y la información obtenida fue unificada para su análisis mediante la herramienta de código abierto Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017). Adicionalmente, utilizamos Excel como soporte para el ordenamiento de datos, la creación de tablas y la elaboración de gráficos de resultados (Cruz Manzo et al. 2024). Para el análisis visual y la representación gráfica de mapas bibliométricos, se empleó el software especializado VOSviewer (Van Eck & Waltman, 2009). Estos pasos se ilustran en la Figura 1.

**Figura 1.** Proceso de búsqueda

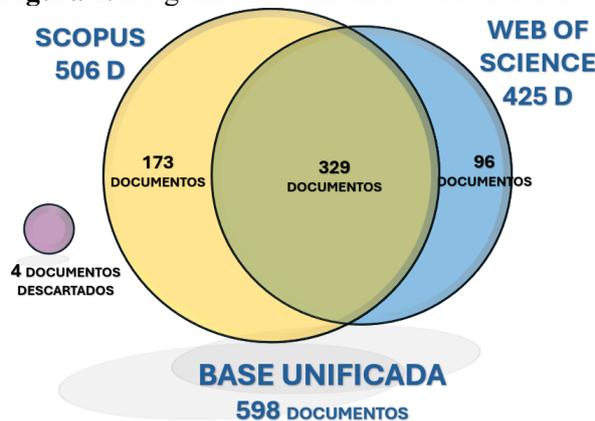


Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de abarcar la mayor cantidad posible de literatura relevante siguiendo las palabras clave definidas para nuestro tema de estudio, se examinaron dos de las principales plataformas de búsqueda académica y de información científica. En años recientes, las bases de datos Web of Science Core Collection y Scopus se han consolidado como fuentes fundamentales para la evaluación de investigaciones científicas. Estos estudios exigen la eliminación de registros duplicados para prevenir errores de sobrerrepresentación (Valderrama-Zurián et al., 2015).

Se llevó a cabo una búsqueda en ambas bases de datos utilizando la ecuación de búsqueda (“LINE BALANCING” OR BALANCING OF LINE) AND “ASSIGNMENT”, obteniéndose 496 documentos de Scopus y 427 documentos de Web of Science (Figura 2). Al analizar la información recopilada de ambas plataformas, se identificaron los artículos presentes en ambas bases de datos, así como aquellos exclusivos de cada una. Los resultados muestran que el 54.7% (329) de los documentos están disponibles en ambas plataformas, mientras que el 28.7% (173) son exclusivos de Scopus, el 15.9% (96) son exclusivos de Web of Science y el 0.7%(4) fueron descartados por contener información repetida o irrelevante. Esto confirma que la cobertura de las dos bases de datos difiere significativamente (Mongeon & Paul-Hus, 2015).

**Figura 2.** Diagrama de Venn entre Web of Science y Scopus



Fuente: Elaboración propia con la base Scopus y WOS.

Tras realizar el análisis, ambas bases de datos fueron unificadas manualmente, eliminando los artículos duplicados. Dado que la mayor cantidad de datos se encontraba en el formato .csv utilizado por Scopus, se integraron a este los 96 artículos provenientes de Web of Science. Para ello, se ajustaron los formatos de los autores al estilo de Scopus y se respetaron las columnas de información originales de dicha base. Finalmente, la base consolidada fue verificada y probada en Biblioshiny de Bibliometrix. En la Tabla 3 se presentan los resultados generales obtenidos de ambas bases de datos, así como de la base unificada. Esta última ofrece una recopilación más sólida, completa y no contiene artículos duplicados, con un total de **598** documentos.

**Tabla 3.** Comparativa de Información general de bases de datos desde Bibliometrix.

MAIN INFORMATION ABOUT DATA	SCOPUS	WOS	UNIFICADA
Timespan	1968:2025	1993:2025	1968:2025
Sources (Journals, Books, etc.)	229	181	267
Documents	<b>506</b>	<b>425</b>	<b>598</b>
Document Average Age	10.2	8.1	9.6
Average citations per doc	23.46	22.49	22.3
Keywords Plus (ID)	2097	412	2219
Author's Keywords (DE)	1068	996	1245
Authors	985	827	1177

Fuente: Elaboración propia con la base Scopus y WOS.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Producción Científica Anual

Como podemos ver en la Figura 3, se identificaron publicaciones desde 1968, donde ya se discutía el desafío de minimizar los costos laborales y de incumplimiento mediante la agrupación de tareas en asignaciones de trabajo para lograr el balanceo de líneas (Kottas & Lau, 1973). Desde entonces, la cantidad de artículos sobre este tema ha ido en aumento, aunque el crecimiento significativo comenzó en 1996. Entre 1996 y 2024 se concentra el 95% de los artículos publicados sobre esta temática. La década de los noventa marcó el inicio de un notable crecimiento en la publicación de artículos, impulsado por las tendencias de la industria manufacturera hacia un mayor nivel de personalización de productos en respuesta a la demanda de los consumidores, lo cual incrementó la necesidad de sistemas de ensamblaje flexibles, capaces de producir simultáneamente múltiples versiones de productos similares (Askin & Zhou, 1997). Durante este período, los investigadores comenzaron a centrarse en el desarrollo de sistemas de asignación flexibles, ya que la cantidad de trabajadores superó al número de máquinas disponibles (Zavadlav et al., 1996). Observamos un pico entre los años 2012 y 2014, periodos en los que los investigadores empiezan a abordar temas enfocados al trabajador y su efecto en la eficiencia del balanceo de línea, por ejemplo, los trabajadores con discapacidad, que representaban aproximadamente el 10% de la población mundial y podían hacer una contribución significativa a todos los niveles de la economía y la sociedad. (Araújo et al., 2012). A diferencia del conocido problema de balanceo de la línea de montaje simple, los tiempos de ejecución de las tareas varían según el trabajador asignado. (Moreira et al., 2012). Tuvieron en cuenta las competencias individuales, la movilidad y las

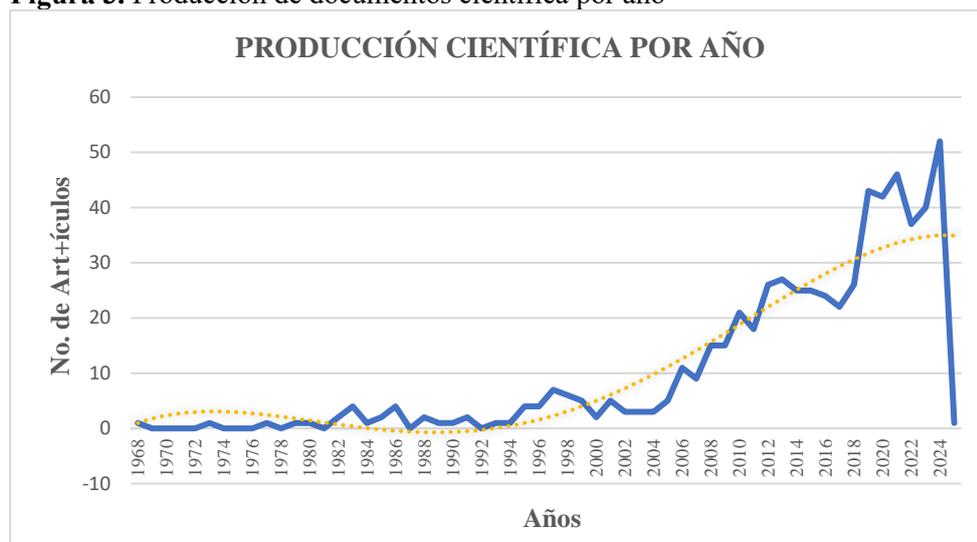
preferencias de cada empleado, así como los requisitos de personal y competencias asociados a cada actividad de montaje (Sabar, 2014). La importancia de las curvas de aprendizaje de cada trabajador como efecto en la eficiencia de la línea. (Stroieke et al., 2013). También, surgió la preocupación por desarrollar métodos que integraran las restricciones del balanceo de línea en entornos reales (Sternatz, 2013; Battaia & Dolgui, 2011).

En los últimos cinco años, se ha observado un repunte significativo en las investigaciones relacionadas con el balanceo de líneas, impulsado por el enfoque en la sostenibilidad y la transición de la Industria 4.0 hacia la Industria 5.0. Este cambio representa un desafío que ha despertado un interés creciente en este ámbito. Los espacios de trabajo compartidos, también conocidos como sistemas híbridos de fabricación colaborativa, están evolucionando hacia entornos más centrados en el ser humano (Abdous et al., 2022).

La coexistencia entre trabajadores y tecnologías avanzadas, como robots colaborativos, ha comenzado a posicionarse como una de las principales áreas de investigación, explorando la posibilidad de que humanos y robots ejecuten simultáneamente tareas en la misma estación de trabajo, ya sea en paralelo o de manera colaborativa (Weckenborg et al., 2019). Esta colaboración en un entorno sin barreras requiere un enfoque más integral que el modelo tradicional de asignación de estaciones de trabajo, de tal manera que se puedan cumplir con las restricciones de tiempo de ciclo y precedencia, así como la disminución de los costos de producción (Kheirabadi et al., 2023; Campana et al., 2021).

Estos avances destacan la necesaria evolución del balanceo de líneas y de las técnicas utilizadas en ingeniería para optimizar la eficiencia global, integrando objetivos que sean no solo productivos, sino también sostenibles.

**Figura 3.** Producción de documentos científica por año



Fuente:Elaboración propia a partir de Bibliometrix

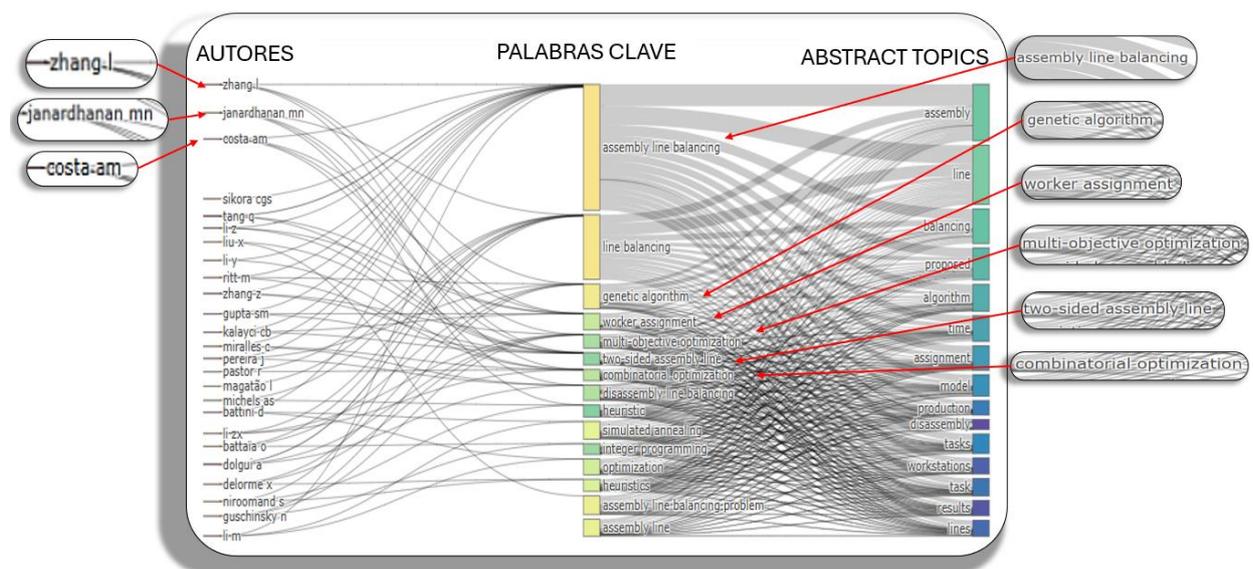
### Relación autores-palabras clave-tópicos de resúmenes

En el gráfico de tres campos (Figura 4) se establece una relación entre los 25 autores con mayor impacto en la literatura (lado izquierdo), identificados automáticamente por Bibliometrix, los 15 temas principales derivados de los resúmenes de los artículos (lado derecho), y las 15 palabras clave más relevantes (en el centro). Este diagrama de Sankey permite visualizar los elementos principales de estos tres campos y sus interrelaciones (Aria & Cuccurullo, 2017), proporcionando una representación clara de las conexiones entre autores, temas y palabras clave.

Identificamos individualmente a Costa, Alysson M., Zhang, Linxuan, y Janardhanan, Mukund Nilakantan como los autores con mayor relación con las palabras clave. En la parte central del análisis se destacaron las palabras clave más vinculadas a ambos lados del mapa, entre las cuales sobresalen “assembly line balancing” y “line balancing”, ya que representan el enfoque central de nuestra investigación y forman parte de la ecuación de búsqueda utilizada en las plataformas de investigación. Después de estas, se identificaron las cinco palabras clave con mayor conexión entre ambos lados: “genetic algorithm”, “worker assignment”, “multi-objective optimization”, “two-sided assembly line” y “combinatorial optimization”. Estos hallazgos sugieren la conveniencia de explorar los artículos de estos autores y analizar el impacto de estas palabras clave, incluso si no son los más citados o recurrentes. Por ejemplo, Janardhanan et al. (2017) propone algoritmos para resolver la asignación de trabajadores y el balanceo de líneas en líneas de ensamblaje de dos lados (*two-sided assembly line*). Moreira et al.

(2012), en colaboración con Costa, Alysson M., presenta una heurística utilizada como decodificador de soluciones dentro de un algoritmo genético (*genetic algorithm*) híbrido para la priorización de tareas. Por su parte, Li et al. (2016), con la participación de Zhang, Linxuan, propone un modelo de programación para minimizar simultáneamente el consumo de energía y el tiempo de ciclo en líneas de ensamblaje de dos lados (*two-sided assembly line*). Estos ejemplos corroboran la conexión entre autores, temas y palabras clave, lo que refuerza la importancia de su análisis para profundizar en nuestra investigación.

**Figura 4.** Mapa de tres campos autores, palabras clave y tópicos de abstract



Fuente:Elaboración propia a partir de Bibliometrix

### Ley de Bradford

Para identificar fuentes relevantes que apoyen la investigación y documentación de este artículo, se aplicó la Ley de Bradford. Este análisis permitió identificar las revistas con mayor cantidad de artículos publicados sobre balanceo de línea y asignación, así como aquellos trabajos más significativos relacionados con el tema (Alvarado, 2016).

La aplicación de la Ley de Bradford permite identificar las revistas clave mediante la división en tres zonas distintas. La Zona 1 agrupa las revistas más importantes, con el mayor número de artículos o citas; le sigue la Zona 2, conocida como Aliadas, y finalmente la Zona 3, denominada Extranjeras. En la Tabla 4 se muestra la relación entre el porcentaje de revistas y la frecuencia de publicación. Se observa que el número de revistas y artículos en cada zona sigue una relación inversamente proporcional: a medida que

aumenta el número de revistas (de la Zona 1 a la Zona 3), el número de artículos por revista disminuye. Esto confirma el comportamiento esperado según la Ley de Bradford (Borghain et al., 2021).

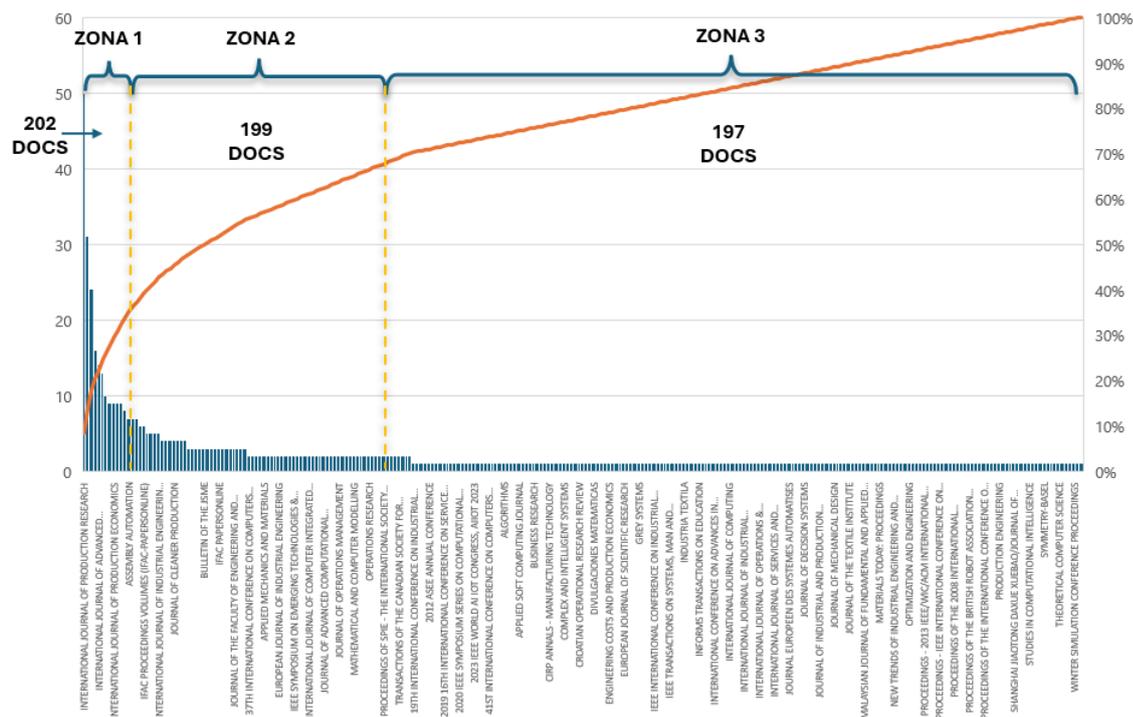
**Tabla 4.** Dispersión de Revistas y Artículos por Zona

ZONA	NUMERO DE REVISTAS	DE FRECUENCIA DE ARTÍCULOS	PORCENTAJE DE REVISTA	PORCENTAJE DE FRECUENCIA
1	12	202	4.5%	33.8%
2	67	199	25.1%	33.3%
3	188	197	70.4%	32.9%
<b>TOTAL</b>	267	598	100.0%	100.0%

Fuente: Elaboración propia con la base Scopus y WOS.

En la Figura 5 se presenta el comportamiento de la distribución de artículos publicados por revista, representado mediante barras azules. La zona 1, que es la más estrecha, incluye las revistas más productivas, con un total de 202 artículos publicados. La zona 2, que abarca un mayor número de revistas, contiene 199 artículos en total. Finalmente, la zona 3, que representa una amplia variedad de revistas con menor productividad individual, suma 197 artículos publicados. Este patrón refleja la concentración de publicaciones relevantes en unas pocas revistas, que corresponde con lo planteado por la Ley de Bradford.

**Figura 5.** Representación visual de la Ley de Bradford



Fuente: Elaboración propia con la base Scopus y WOS.

### Autores más relevantes

Después de extraer la información de nuestra base de datos utilizando Bibliometrix, identificamos a los autores más relevantes y realizamos un análisis detallado de la productividad de los 15 mejor posicionados. Para ello, contrastamos dos enfoques de medición: el primero asigna el mismo peso a cada artículo, independientemente de si el autor figura como principal o colaborador; mientras que el segundo utiliza datos fraccionados, los cuales otorgan un peso ponderado a los artículos en función del rol del autor, ya sea como colaborador o coautor. (Egghe & Rousseau, 1990). Este último enfoque proporciona una representación más equitativa y precisa del impacto real de los autores en la investigación los cuales observamos en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Comparativa entre autores relevantes por número de artículo, sin ponderar y fraccionados

AUTOR	Nº ARTÍCULOS	DE RANK	AUTOR	ARTÍCULOS FRACCIONADOS	RANK
TANG Q	24	1	TANG Q	6.5	1
DOLGUI A	17	2	PEREIRA J	5.8	5
ZHANG Z	15	3	DOLGUI A	5.5	2
PEREIRA J	10	4	ZHANG Z	4.2	3
LI Z	11	5	COSTA AM	3.6	6
COSTA AM	10	6	GUPTA SM	3.6	8
ZHANG L	10	7	KALAYCI CB	3.6	9
GUPTA SM	8	8	SIKORA CGS	3.4	10



KALAYCI CB	8	9	RITT M	3.3	11
SIKORA CGS	8	10	LI Z	3.1	4
RITT M	8	11	TIACCI L	3.0	65
MIRALLES C	8	12	ZHANG L	2.8	7
LI M	8	13	MIRALLES C	2.7	12
BATTINI D	8	14	PINARBAŞI M	2.7	27
LI Y	7	15	KOLTAI T	2.4	28

Fuente:Elaboración propia a partir de Bibliometrix

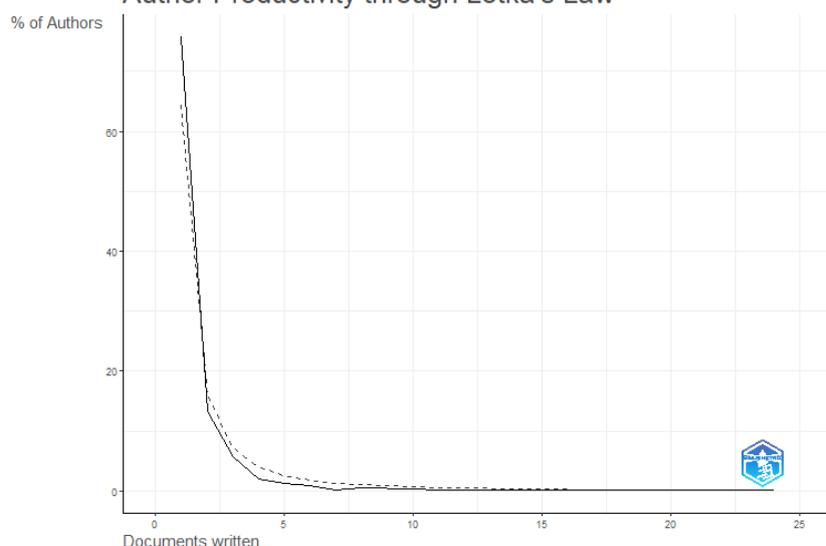
Identificamos a los 15 autores con mayor impacto en la literatura sobre balanceo de línea, proporcionando una guía para revisar de manera específica sus publicaciones, dado su nivel de productividad en este campo científico. Al comparar ambos enfoques de conteo (tradicional y fraccionado), observamos que los 10 primeros lugares solo cambiaron de posición, manteniéndose Tang Q como el autor más productivo. Sin embargo, el conteo fraccionado permitió destacar a Tiacci L, Pinarbaşı M y Koltai T, quienes ahora se encuentran entre los primeros 15 autores, mientras que bajo el conteo tradicional ocupaban las posiciones 65, 27 y 28, respectivamente. Cabe destacar que autores como Gupta SM y Kalaycy CB han participado únicamente como colaboradores, lo cual también refleja la influencia de su trabajo en roles secundarios.

### Ley LOTKA

La Ley de Lotka establece que un pequeño porcentaje de autores genera la mayoría de los artículos, mientras que una gran cantidad de autores contribuye con pocos trabajos (Lotka, 1926). En la Figura 6 se observa que los datos de productividad se ajustan a esta distribución. De los 1,177 autores registrados en nuestra base de datos unificada, 891 (equivalente al 75.7%) han participado en 891 artículos. Por otro lado, 286 autores, representando el 24.3%, han contribuido en un total de 903 artículos, ya sea como autores principales o en colaboración.



**Figura 6.** Representación de ley Lotka en literatura de balanceo de línea con asignación  
Author Productivity through Lotka's Law



Fuente:Elaboración propia a partir de Bibliometrix

### Palabras frecuentes y coocurrencia

El análisis de las palabras más frecuentes y sus relaciones es, probablemente, uno de los ejercicios más enriquecedores para nuestro estudio, ya que permite identificar conceptos clave, temas recurrentes, metodologías utilizadas y tendencias en la literatura. Para ello, utilizamos la información generada por **Bibliometrix** sobre las palabras más mencionadas y realizamos un análisis detallado de sus relaciones mediante mapas de coocurrencia creados con VOSviewer. Este enfoque nos ayudó a comprender los conceptos esenciales que debemos abordar para profundizar en nuestro tema de investigación, así como a identificar tendencias clave investigaciones (Van Eck & Waltman, 2009). Además, a través de mapas de coocurrencias a través del tiempo, detectamos posibles temas emergentes que podrían ser de interés para futuras investigaciones.

En la Tabla 6 se presenta una lista de las 25 palabras más frecuentes, obtenidas a partir del análisis realizado con Bibliometrix. Este análisis se basó en tres criterios de selección: las palabras clave proporcionadas por los autores, los bigrams extraídos de los resúmenes de los artículos y los trigramas identificados también en los resúmenes.

**Tabla 6.** Palabras más frecuentes en palabras clave de autores, bigramas y trigramas de resúmenes

N	PALABRAS CLAVE DEL AUTOR		BIGRAMAS EN ABSTRACT		TRIGRAMAS EN ABSTRACT	
	PALABRAS	OCURRENCIAS	PALABRAS	OCURRENCIAS	PALABRAS	OCURRENCIAS
1	assembly line balancing	171	assembly line	868	assembly line balancing	457
2	line balancing	97	line balancing	689	disassembly line balancing	68
3	genetic algorithm	33	assembly lines	267	simple assembly line	46
4	assembly line balancing problem	27	cycle time	265	two-sided assembly line	42
5	assembly line	24	disassembly line	129	mixed-model assembly line	36
6	simulated annealing	23	genetic algorithm	109	assembly line worker	28
7	heuristics	22	task assignment	106	u-shaped assembly	28
8	optimization	22	proposed algorithm	84	line worker assignment	27
9	Worker assignment	22	programming model	71	ant colony optimization	26
10	combinatorial optimization	19	Worker assignment	71	integer linear programming	26
11	disassembly line balancing	18	mathematical model	67	simulated annealing algorithm	24
12	multi-objective optimization	18	production line	60	integer programming model	23
13	integer programming	17	simulated annealing	55	Informa uk limited	20
14	two-sided assembly line	17	two-sided assembly	55	linear programming model	20
15	heuristic	15	linear programming	52	mixed integer linear	20
16	constraint programming	14	optimal solutions	51	uk limited trading	20
17	cycle time	14	simple assembly	49	mixed model assembly	19
18	scheduling	14	integer programming	47	robotic assembly line	19
19	assembly lines	13	Mixed-model assembly	46	line balancing alb	17
20	metaheuristics	13	proposed model	46	particle swarm optimization	17
21	simulation	13	task times	46	Mixed integer programming	16
22	mathematical programming	12	assembly task	45	robotic disassembly line	16
23	disassembly	11	u-shaped assembly	45	artificial bee colony	15
24	mixed integer linear programming	11	computational results	44	Mixed integer programming	15
25	production	10	precedence constraints	44	multi-manned assembly line	15

Fuente:Elaboración propia a partir de Bibliometrix



Una vez identificadas las 25 palabras más frecuentes según cada criterio, se procedió a seleccionar aquellas que representaran un tipo de línea de ensamble, un sector de producción, un método de solución o conceptos relacionados con modelos o técnicas de balanceo de líneas. En este proceso, se descartaron inicialmente conceptos redundantes como *assembly line balancing*, *line balancing* o *assembly line*, ya que, aunque son las más frecuentes, representan el tema principal de nuestra investigación y no aportan nuevos elementos. También se excluyeron palabras demasiado generales, como *production*; términos ambiguos, como *model proposed*; y aquellos implícitos en otros conceptos o métodos, como *cycle time*. Tras este proceso de selección analítica, se generó una tabla refinada que consolidó las palabras seleccionadas de cada columna. Finalmente, se eliminaron los términos duplicados, obteniendo una contribución única de palabras provenientes de los tres criterios analizados: palabras clave de los autores, así como bigramas y trigramas extraídos de los resúmenes de los artículos que se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Palabras Refinadas Más Frecuentes en Palabras Clave de Autores, Bigramas y Trigramas de resúmenes

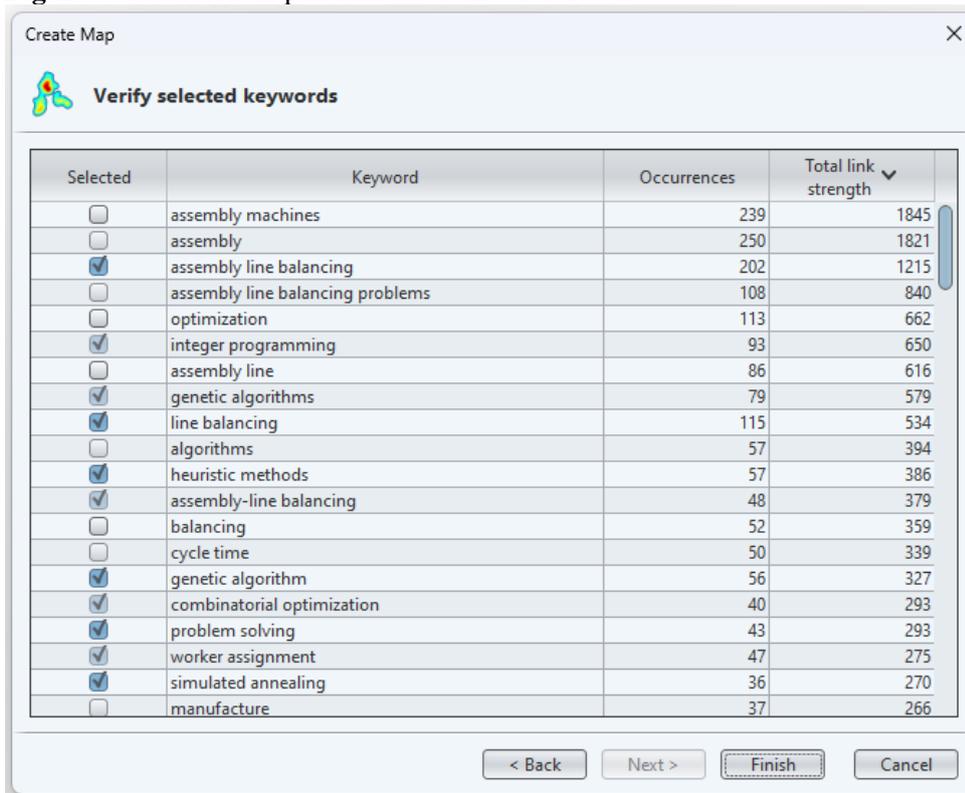
n	PALABRAS	OCURENCIAS	n	PALABRAS	OCURENCIAS
1	genetic algorithm	<b>33</b>	12	u-shaped assembly	<b>45</b>
2	simple assembly line	<b>46</b>	13	constraint programming	<b>14</b>
3	simulated annealing	<b>23</b>	14	ant colony optimization	<b>26</b>
4	Worker assignment	<b>71</b>	15	mathematical programming	<b>12</b>
5	task assignment	<b>106</b>	16	linear programming model	<b>20</b>
6	two-sided assembly line	<b>42</b>	17	mixed integer linear	<b>20</b>
7	combinatorial optimization	<b>19</b>	18	mixed model assembly	<b>19</b>
8	mixed-model assembly line	<b>36</b>	19	robotic assembly line	<b>19</b>
9	disassembly line balancing	<b>18</b>	20	particle swarm optimization	<b>17</b>
10	multi-objective optimization	<b>18</b>	21	artificial bee colony	<b>15</b>
11	integer programming	<b>17</b>	22	multi-manned assembly line	<b>15</b>

Fuente:Elaboración propia a partir de Bibliometrix

Como parte del análisis de palabras frecuentes, se utilizó la base de datos unificada en VOSviewer para generar un mapa bibliométrico de coocurrencia. Siguiendo los mismos criterios aplicados en la refinación de palabras frecuentes de la Tabla 7, seleccionamos palabras clave identificadas por VOSviewer. En esta ocasión, decidimos incluir el término *assembly line balancing* para analizar su correlación con otros conceptos clave. Establecimos un umbral mínimo de 15 ocurrencias, lo que resultó en 114 palabras disponibles para selección (Figura 7). Posteriormente, excluimos términos generales, ambiguos o implícitos en otros conceptos, asegurando así una selección más precisa y relevante.



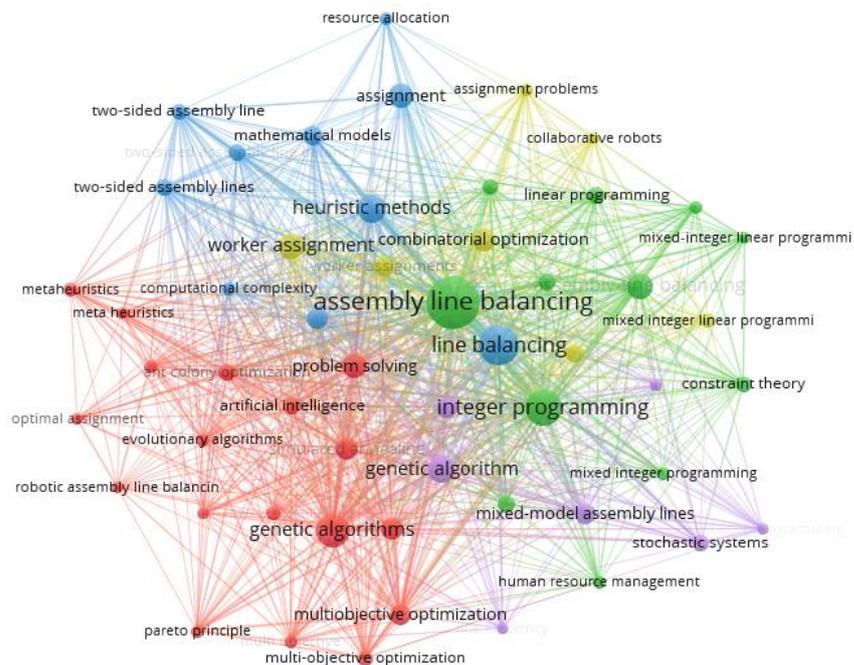
**Figura 7.** Selección de palabras clave en VOSviewer



Fuente:Elaboración propia a partir de VOSviewer

En un primer análisis visual, se identificaron cinco clústeres diferenciados por los colores asignados en el mapa, según la representación gráfica de VOSviewer. Cada clúster está liderado por términos clave, los cuales destacan por tener un tamaño de letra mayor y un nodo más grande en comparación con el resto. Estos elementos permiten identificar los conceptos principales asociados a cada clúster, como se ilustra en la Figura 8.

**Figura 8.** Mapa bibliométrico de co-ocurrencia de palabras clave



Fuente:Elaboración propia a partir de VOSviewer

Al interactuar manualmente con el mapa y pasar el cursor sobre la palabra *assembly line balancing*, las líneas de correlación se resaltan, evidenciando de manera más clara la fuerte conexión entre los diferentes clústeres, como se observa en la Figura 9. En la Tabla 8, se enumeran los clústeres identificados junto con las palabras más destacadas visualmente dentro de cada uno. Este análisis proporciona un enfoque valioso para orientar los esfuerzos de nuestra investigación, permitiendo una revisión de literatura más eficiente y focalizada.

**Tabla 8.** Clústeres y Palabras Clave

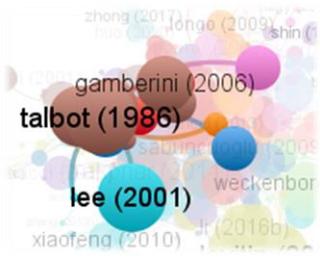
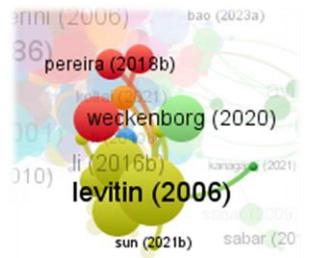
Nº clúster	color	palabra destacada
1	verde	integer programming
2	lila	mixed-model assembly lines
3	rojo	genetic algorithm
4	azul	heuristic methods
5	amarillo	worker assignment

Fuente: Elaboración propia a partir de Vosviewer.



título del documento, el año de publicación y la fuente correspondiente. Toda esta información se recopiló y organizó en la Tabla 9, junto con el mapa de red asociado a cada uno de los documentos analizados.

**Tabla 9.** Documentos Identificados en el Mapa de Red Densidad

N° CLÚSTER	AUTHOR	NETWORK	DOCUMENT	YEAR	SOURCE
CLUSTER 8	Brian Talbot		Comparative Evaluation of Heuristic Line Balancing Techniques	1986	Managment Science
CLUSTER 6	Tae Lee		Two-Sided Assembly Line to Maximize Work Relatedness and Slackness	2001	Computers and Industrial Engineering
CLUSTER 4	Gregory Levitin		A Genetic Algorithm for Robotic Assembly Line Balancing	2006	European journal of operational research
CLUSTER 2	Tevhide Altekin		Profit-Oriented Disassembly-Line Balancing	2008	International Journalof Production Research

Fuente:Elaboración propia a partir de Bibliometrix

Estos artículos presentan diversos enfoques relacionados con el balanceo de líneas. El artículo “Comparative Evaluation of Heuristic Line Balancing Techniques” se centra en analizar y comparar el desempeño de 26 reglas heurísticas utilizadas para asignar tareas a estaciones de trabajo en líneas de ensamblaje. Su objetivo es proporcionar recomendaciones prácticas para seleccionar la heurística más adecuada según diferentes escenarios industriales (Talbot et al., 1986). Por su parte, el artículo “Two-

Sided Assembly Line Balancing to Maximize Work Relatedness and Slackness” aborda la optimización del balanceo en líneas de montaje de dos lados, enfocándose en maximizar tanto la relación laboral como la holgura laboral, dos factores clave en las líneas de producción de ensamble (Lee et al., 2001).

En el caso del artículo “A Genetic Algorithm for Robotic Assembly Line Balancing”, se propone un enfoque para el balanceo de líneas de ensamblaje robóticas, donde se busca maximizar la productividad asignando de manera óptima a los robots a las estaciones de trabajo y distribuyendo equilibradamente las tareas entre ellas (Levitin et al., 2002). Finalmente, el artículo “Profit-Oriented Disassembly-Line Balancing” trata el balanceo de líneas de desensamblaje parcial con un enfoque en la maximización del beneficio. Su objetivo es encontrar una asignación factible de tareas de desensamblaje a las estaciones, asegurando relaciones de precedencia y maximizando el valor obtenido (Altekin et al., 2008).

Por otra parte, a partir del análisis realizado con Bibliometrix sobre los documentos más citados, identificamos los 15 artículos con mayor número de citas en nuestra base de datos. Las citas son un indicador comúnmente utilizado para medir el impacto científico, uno de los componentes del concepto de calidad científica. Sin embargo, es importante señalar que no deben considerarse como el único ni el más importante criterio de calidad, ya que las citas no abarcan todos los aspectos que definen la calidad de una investigación (Aksnes et al., 2019).

En la Tabla 10 se presentan los artículos más citados utilizando dos criterios: primero, se identificaron los 15 artículos con mayor número de citas a nivel global; en segundo lugar, se consideraron los artículos con citas normalizadas, un enfoque diseñado para ser equitativos con publicaciones más recientes que, a pesar de tener un corto tiempo desde su publicación, pueden tener un impacto significativo. Posteriormente, se unificaron ambas listas, eliminando los artículos duplicados para obtener un conjunto único de referencias destacadas.

**Tabla 10.** Documentos con más Impacto por Citación Global y Normalizada

Nº	Author	Title	Year
1	Dolgui A.; Proth J.-M.	Supply chain engineering: Useful methods and techniques	2010
2	Altekin F.T.; Kandiller L.; Ozdemirel N.E.	Profit-oriented disassembly-line balancing	2008
3	Talbot F.Brian; Patterson James H.; Gehrlein William V.	COMPARATIVE EVALUATION OF HEURISTIC LINE BALANCING TECHNIQUES.	1986
4	Lee T.O.; Kim Y.; Kim Y.K.	Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness	2001
5	Levitin G.; Rubinovitz J.; Shnits B.	A genetic algorithm for robotic assembly line balancing	2006
6	Dimopoulos C.; Zalzalá A.M.S.	Recent developments in evolutionary computation for manufacturing optimization: Problems, solutions, and comparisons	2000
7	Kalayci C.B.; Gupta S.M.	Artificial bee colony algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem	2013
8	Otto A.; Scholl A.	Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing	2011
9	Gonçalves J.F.; De Almeida J.R.	A hybrid genetic algorithm for assembly line balancing	2002
10	Kalayci C.B.; Polat O.; Gupta S.M.	A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing problem	2016
11	Kalayci C.B.; Gupta S.M.	A particle swarm optimization algorithm with neighborhood-based mutation for sequence-dependent disassembly line balancing problem	2013
12	Gamberini R.; Grassi A.; Rimini B.	A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem	2006
13	Ding L.-P.; Feng Y.-X.; Tan J.-R.; Gao Y.-C.	A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem	2010
14	Avikal S.; Mishra P.K.; Jain R.	A Fuzzy AHP and PROMETHEE method-based heuristic for disassembly line balancing problems	2014
15	Baykasoğlu A.	Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems	2006
16	Guo J.; Li Y.; Du B.; Wang K.	Multi-objective fuzzy partial disassembly line balancing considering preventive maintenance scenarios using enhanced hybrid artificial bee colony algorithm	2024
17	Qin S.; Li J.; Wang J.; Guo X.; Liu S.; Qi L.	A Salp Swarm Algorithm for Parallel Disassembly Line Balancing Considering Workers with Government Benefits	2024
18	Zhang Z.; Chica M.; Tang Q.; Li Z.; Zhang L.	A multi-objective co-evolutionary algorithm for energy and cost-oriented mixed-model assembly line balancing with multi-skilled workers	2024
19	Liang J.; Guo S.; Du B.; Li Y.; Guo J.; Yang Z.; Pang S.	Minimizing energy consumption in multi-objective two-sided disassembly line balancing problem with complex execution constraints using dual-individual simulated annealing algorithm	2021
20	Dalle Mura M.; Dini G.	Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach	2019
21	Liu J.; Zhou Z.; Pham D.T.; Xu W.; Ji C.; Liu Q.	Collaborative optimization of robotic disassembly sequence planning and robotic disassembly line balancing problem using improved discrete Bees algorithm in remanufacturing☆	2020
22	Weckenborg C.; Kieckhäfer K.; Müller C.; Grunewald M.; Spengler T.S.	Balancing of assembly lines with collaborative robots	2020
23	Chiang W.-C.; Kouvelis P.; Urban T.	Line balancing in a just-in-time production environment: Balancing multiple U-lines	2007
24	Abdous M.A.; Delorme X.; Battini D.; Sgarbossa F.; Berger-Douce S.	Assembly line balancing problem with ergonomics: a new fatigue and recovery model	2023

Fuente:Elaboración propia a partir de Bibliometrix



Derivado del análisis de los mapas bibliométricos de citación por red y densidad, así como de las tablas de citación global y normalizada, se pueden distinguir varios puntos interesantes. Entre los autores destacados en la lista de artículos más citados a nivel global se encuentran Altekin F.T., Lee T., Levitin G. y Talbot F. que también destacan en los mapas de red y densidad de VOSviewer. Sin embargo, Dolgui A. aparece únicamente en las listas de citación global y normalizada, pero no en los mapas de citación generados con VOSviewer. Esto podría deberse a una débil conexión de sus documentos con otros dentro del conjunto de datos, lo que limita su relevancia dentro de la red de citación.

También es importante señalar que Kalayci C.B. aporta dos documentos entre los más citados. Asimismo, destaca la presencia de Dimopoulos C., identificado gracias a la unificación de bases de datos con información de Web of Science, lo que permitió incluirlo en el análisis; de otro modo, habría pasado desapercibido.

Por último, se deben revisar los documentos de Qin S., Zhang Z. y Guo J., que, a pesar de haber sido publicados este año, ya han tenido un impacto significativo según su número de citas: 15, 11 y 9, respectivamente. Estos trabajos podrían ofrecer nuevos métodos de solución o abrir futuras líneas de investigación en el área.

## **CONCLUSIONES**

La industria manufacturera ha demostrado una notable capacidad de adaptación para optimizar tanto sus procesos operativos como gerenciales. Por un lado, la incorporación de tecnología, como robots, sistemas automatizados y herramientas de inteligencia artificial, ha revolucionado las líneas de producción. Por otro lado, los modelos de balanceo de líneas continúan desempeñando un papel clave, al permitir una planificación eficiente de estaciones de trabajo para satisfacer la demanda, maximizando la productividad.

El análisis bibliométrico y la revisión de literatura realizados en este estudio revelan un crecimiento significativo en las investigaciones sobre balanceo de líneas desde 1996, representando un 95% del total de artículos publicados. Entre las palabras clave más destacadas se identifican conceptos relacionados con la inteligencia artificial, robots colaborativos y líneas de ensamblaje bilaterales, evidenciando un cambio hacia métodos avanzados de solución y tecnologías emergentes y dejando en segundo plano métodos tradicionales de solución como la programación lineal y métodos heurísticos. Los cambios en



los procesos de manufactura también han influido en las temáticas investigadas, destacando términos emergentes como "robots colaborativos" y "línea de ensamble bilateral".

Un aspecto destacado es la importancia creciente de los modelos que consideran la "asignación de tareas" basado en las competencias específicas de los trabajadores, dado que muchos procesos aún dependen de la mano de obra humana. Este enfoque busca adaptar las tareas a las habilidades individuales, así como también integrar factores como restricciones ergonómicas maximizando la eficiencia y atendiendo a las necesidades específicas de cada entorno de producción.

La transición hacia la Industria 5.0 enfatiza la colaboración humano-robot y el diseño centrado en el ser humano, lo que representa un cambio de paradigmas en el balanceo de líneas de producción. Este enfoque plantea oportunidades para explorar métodos emergentes como la inteligencia artificial y algoritmos multiobjetivo, mientras se optimizan los recursos y se reducen los impactos ambientales, bajo este contexto las futuras líneas de investigación se orientan hacia el desarrollo de modelos de desensamble aplicados a la industria del reciclaje, la integración de sistemas híbridos que involucren colaboración entre humanos y robots, y el uso de métodos avanzados de solución basados en inteligencia artificial. Estos temas representan oportunidades clave para seguir mejorando los procesos de manufactura en un contexto de sostenibilidad y tecnología de vanguardia.

Finalmente, el balanceo de líneas sigue siendo un campo clave en la optimización de procesos productivos. La integración de métodos de asignación basados en competencias, junto con el uso de tecnologías avanzadas y enfoques sostenibles, representa una dirección prometedora para la investigación y la práctica en este ámbito.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Abdous, M., Delorme, X., Battini, D., & Berger-Douce, S. (2022). Multi-objective collaborative assembly line design problem with the optimisation of ergonomics and economics. *International Journal Of Production Research*, 61(22), 7830-7845.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2153185>.

Abdous, M., Delorme, X., Battini, D., Sgarbossa, F., & Berger-Douce, S. (2022). Assembly line balancing problem with ergonomics: a new fatigue and recovery model. *International Journal Of Production Research*, 61(3), 693-706. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2015081>



- Aksnes, D. W., Langfeldt, L., & Wouters, P. (2019). Citations, Citation Indicators, and Research Quality: An Overview of Basic Concepts and Theories. *SAGE Open*, 9(1), 215824401982957. <https://doi.org/10.1177/2158244019829575>
- Altekin, F. T., Kandiller, L., & Ozdemirel, N. E. (2008). Profit-oriented disassembly-line balancing. *International Journal Of Production Research*, 46(10), 2675-2693. <https://doi.org/10.1080/00207540601137207>
- Alvarado, R. U. (2016). El crecimiento de la literatura sobre la ley de Bradford. *Investigación Bibliotecológica Archivonomía Bibliotecología E Información*, 30(68), 51-72. <https://doi.org/10.1016/j.ibbai.2016.02.003>.
- Araújo, F. F., Costa, A. M., & Miralles, C. (2012). Two extensions for the ALWABP: Parallel stations and collaborative approach. *International Journal Of Production Economics*, 140(1), 483-495. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.06.032>.
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal Of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.
- Askin, R. G., & Zhou, M. (1997). A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 35(11), 3095–3106. <https://doi.org/10.1080/002075497194309>.
- Avikal, S., Mishra, P., & Jain, R. (2013). A Fuzzy AHP and PROMETHEE method-based heuristic for disassembly line balancing problems. *International Journal Of Production Research*, 52(5), 1306-1317. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.831999>
- Battaïa, O., & Dolgui, A. (2011). Reduction approaches for a generalized line balancing problem. *Computers & Operations Research*, 39(10), 2337-2345. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.11.022>.
- Baykasoglu, A. (2006). Multi-rule Multi-objective Simulated Annealing Algorithm for Straight and U Type Assembly Line Balancing Problems. *Journal Of Intelligent Manufacturing*, 17(2), 217-232. <https://doi.org/10.1007/s10845-005-6638-y>



- Becker, C., & Scholl, A. (2004). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal Of Operational Research*, 168(3), 694-715. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023>
- Bilir, Y. E., Dişbudak, B., Aydın, O., Demirhisar, E., Koçak, B. S., Durğay, Y., Akkaya, S. B., & Gökçe, M. A. (2023). Assembly Line and Workload Balancing with Competency-Based Worker Assignment in Apparel Production. En *Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 737-748). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24457-5\\_58](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24457-5_58)
- Borghain, D. J., Verma, M. K., Nazim, M., & Sarkar, M. (2021b). Application of Bradford's law of scattering and Leimkuhler model to information science literature. *Collnet Journal Of Scientometrics And Information Management*, 15(1), 197-212. <https://doi.org/10.1080/09737766.2021.1943041>
- Boysen, N., Schulze, P., & Scholl, A. (2021). Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? *European Journal Of Operational Research*, 301(3), 797-814. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.11.043>
- Campana, N. P., Iori, M., & Moreira, M. C. O. (2021). Mathematical models and heuristic methods for the assembly line balancing problem with hierarchical worker assignment. *International Journal Of Production Research*, 60(7), 2193-2211. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1884767>.
- Cruz Manzo, J., Bolaños González, F. F., Ortuño Barba, L. C., Villafuerte Palavicini, F. S., & Áraoz Baltazar, I. (2024). Bibliometría del Uso del Blockchain en la Economía Circular: Decisión Hacia la Sostenibilidad. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 9165–9180. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i5.14304](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14304)
- Chiang, W., Kouvelis, P., & Urban, T. L. (2007). Line balancing in a just-in-time production environment: balancing multiple U-lines. *IIE Transactions*, 39(4), 347-359. <https://doi.org/10.1080/07408170600838340>
- Dimopoulos, C., & Zalzala, A. (2000). Recent developments in evolutionary computation for manufacturing optimization: problems, solutions, and comparisons. *IEEE Transactions On Evolutionary Computation*, 4(2), 93-113. <https://doi.org/10.1109/4235.850651>



- Ding, L., Feng, Y., Tan, J., & Gao, Y. (2010). A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 48(5-8), 761-771. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2303-5>
- Dolgui, A., & Proth, J. (2010). Supply Chain Engineering. En *Springer eBooks*.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-84996-017-5>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal Of Business Research*, 133, 285-296.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Egghe, L., & Rousseau, R. (1990). *Introduction to Informetrics. Quantitative Methods in Library, Documentation and Information Science*. Document Server@UHasselt.  
<http://hdl.handle.net/1942/587>.
- Gamberini, R., Grassi, A., & Rimini, B. (2005). A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem. *International Journal Of Production Economics*, 102(2), 226-243. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.02.013>
- Ghosh, S., & Gagnon, R. J. (1989). A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal Of Production Research*, 27(4), 637-670. <https://doi.org/10.1080/00207548908942574>
- Gonçalves, J. F., & de Almeida, J. R. (2002). *Journal of Heuristics*, 8(6), 629–642.  
<https://doi.org/10.1023/a:1020377910258>
- Guo, J., Li, Y., Du, B., & Wang, K. (2023). Multi-objective fuzzy partial disassembly line balancing considering preventive maintenance scenarios using enhanced hybrid artificial bee colony algorithm. *Expert Systems With Applications*, 237, 121681.  
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121681>
- Janardhanan, M. N., Li, Z., Nielsen, P., & Tang, Q. (2017). Artificial bee colony algorithms for two-sided assembly line worker assignment and balancing problem. En *Advances in intelligent systems and computing* (pp. 11-18). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62410-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62410-5_2).



- Kalayci, C. B., & Gupta, S. M. (2013). A particle swarm optimization algorithm with neighborhood-based mutation for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 69(1-4), 197-209.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-013-4990-1>
- Kalayci, C. B., Polat, O., & Gupta, S. M. (2014). A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Annals Of Operations Research*, 242(2), 321-354.  
<https://doi.org/10.1007/s10479-014-1641-3>
- Katiraei, N., Calzavara, M., Finco, S., Battaia, O., & Battini, D. (2022). Assembly line balancing and worker assignment considering workers' expertise and perceived physical effort. *International Journal Of Production Research*, 61(20), 6939-6959.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2140219>
- Kheirabadi, M., Keivanpour, S., Chinniah, Y. A., & Frayret, J. (2023). Human-robot collaboration in assembly line balancing problems: Review and research gaps. *Computers & Industrial Engineering*, 186, 109737. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109737>.
- Kottas, J. F., & Lau, H. (1973). A Cost-Oriented Approach to Stochastic Line Balancing1. *A I I E Transactions*, 5(2), 164-171. <https://doi.org/10.1080/05695557308974897>.
- Lalaoui, M., & Afia, A. E. (2019). A versatile generalized simulated annealing using type-2 fuzzy controller for the mixed-model assembly line balancing problem. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2804-2809. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.633>
- Lee, T. O., Kim, Y., & Kim, Y. K. (2001). Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. *Computers & Industrial Engineering*, 40(3), 273-292.  
[https://doi.org/10.1016/s0360-8352\(01\)00029-8](https://doi.org/10.1016/s0360-8352(01)00029-8)
- Levitin, G., Rubinovitz, J., & Shnits, B. (2002). A GENETIC ALGORITHM FOR ROBOTIC ASSEMBLY LINE BALANCING. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1), 79-84.  
<https://doi.org/10.3182/20020721-6-es-1901.00016>
- Li, Z., Tang, Q., & Zhang, L. (2016). Minimizing energy consumption and cycle time in two-sided robotic assembly line systems using restarted simulated annealing algorithm. *Journal Of Cleaner Production*, 135, 508-522. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.131>.



- Liang, J., Guo, S., Du, B., Li, Y., Guo, J., Yang, Z., & Pang, S. (2020b). Minimizing energy consumption in multi-objective two-sided disassembly line balancing problem with complex execution constraints using dual-individual simulated annealing algorithm. *Journal Of Cleaner Production*, 284, 125418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125418>
- Liu, J., Zhou, Z., Pham, D. T., Xu, W., Ji, C., & Liu, Q. (2019). Collaborative optimization of robotic disassembly sequence planning and robotic disassembly line balancing problem using improved discrete Bees algorithm in remanufacturing☆. *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101829. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101829>
- Lotka, A. J. (1926). The frequency distribution of scientific productivity. *Journal Of The Washington Academy Of Sciences*, 16(12). <http://patterns.architexturez.net/doc/az-cf-173015>.
- Mongeon, P., & Paul-Hus, A. (2015). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213-228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>.
- Moreira, M. C. O., Ritt, M., Costa, A. M., & Chaves, A. A. (2012). Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Journal Of Heuristics*, 18(3), 505-524. <https://doi.org/10.1007/s10732-012-9195-5>
- Mura, M. D., & Dini, G. (2019). Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach. *CIRP Annals*, 68(1), 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.006>
- Otto, A., & Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal Of Operational Research*, 212(2), 277-286. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.056>
- Pan, Y., & Li, H. (2016). Sustainability evaluation of end-of-life vehicle recycling based on emergy analysis: a case study of an end-of-life vehicle recycling enterprise in China. *Journal Of Cleaner Production*, 131, 219-227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.045>
- Pilati, F., Ferrari, E., Gamberi, M., & Margelli, S. (2021). Multi-Manned Assembly Line Balancing: Workforce Synchronization for Big Data Sets through Simulated Annealing. *Applied Sciences*, 11(6), 2523. <https://doi.org/10.3390/app11062523>
- Qin, S., Li, J., Wang, J., Guo, X., Liu, S., & Qi, L. (2023). A Salp Swarm Algorithm for Parallel Disassembly Line Balancing Considering Workers With Government Benefits. *IEEE Transactions On Computational Social Systems*, 11(1), 282-291.



<https://doi.org/10.1109/tcss.2023.3238965>

- Sabar, M. (2014). Multi-agent Approach for Personnel Scheduling and Rescheduling in Assembly Centers. En *Lecture notes in computer science* (pp. 345-354). [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44739-0\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44739-0_42).
- Sikora, C. G. S., & Weckenborg, C. (2022). Balancing of assembly lines with collaborative robots: comparing approaches of the Benders' decomposition algorithm. *International Journal Of Production Research*, 61(15), 5117-5133. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2093684>
- Sternatz, J. (2013). Enhanced multi-Hoffmann heuristic for efficiently solving real-world assembly line balancing problems in automotive industry. *European Journal Of Operational Research*, 235(3), 740-754. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.005>.
- Stroieke, R. E., Fogliatto, F. S., & Anzanello, M. J. (2013). Estado da arte das aplicações de curvas de aprendizado. *Gestão & Produção*, 20(3), 681-694. <https://doi.org/10.1590/s0104-530x2013000300013>.
- Talbot, F. B., Patterson, J. H., & Gehrlein, W. V. (1986). A Comparative Evaluation of Heuristic Line Balancing Techniques. *Management Science*, 32(4), 430-454. <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.4.430>
- Trost, M., Claus, T., & Herrmann, F. (2022a). Social Sustainability in Production Planning: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 14(13), 8198. <https://doi.org/10.3390/su14138198>
- Valderrama-Zurián, J. C., Aguilar-Moya, R., Melero-Fuentes, D., & Aleixandre-Benavent, R. (2015). A systematic analysis of duplicate records in Scopus. *Journal Of Informetrics*, 9(3), 570-576. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2015.05.002>.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2009). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Vickery, B. (1948). BRADFORD'S LAW OF SCATTERING. *Journal Of Documentation*, 4(3), 198-203. <https://doi.org/10.1108/eb026133>



Weckenborg, C., Kieckhäfer, K., Müller, C., Grunewald, M., & Spengler, T. S. (2019). Balancing of assembly lines with collaborative robots. *BuR - Business Research*, 13(1), 93-132.

<https://doi.org/10.1007/s40685-019-0101-y>.

Zavadlav, E., McClain, J. O., & Thomas, L. J. (1996). Self-Buffering, Self-Balancing, Self-Flushing production lines. *Management Science*, 42(8), 1151-1164.

<https://doi.org/10.1287/mnsc.42.8.1151>.

Zhang, Z., Chica, M., Tang, Q., Li, Z., & Zhang, L. (2023). A multi-objective co-evolutionary algorithm for energy and cost-oriented mixed-model assembly line balancing with multi-skilled workers. *Expert Systems With Applications*, 236, 121221.

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121221>.

