

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2025,  
Volumen 9, Número 5.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i5](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5)

## **MINIMIZACIÓN DE TIEMPOS DE CICLO EN EL PROBLEMA BALANCEO DE LÍNEAS DE ENSAMBLE MEDIANTE UN HEURÍSTICO HÍBRIDO**

**MINIMIZATION OF CYCLE TIMES IN THE  
ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM USING  
A HYBRID HEURISTIC APPROACH**

**Sergio Zayago Sandoval**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

**Gustavo Erick Anaya Fuentes**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

**Sergio Blas Ramírez Reyna**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i5.19847](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.19847)

## Minimización de Tiempos de Ciclo en el Problema Balanceo de Líneas de Ensamble Mediante un Heurístico Híbrido

**Sergio Zayago Sandoval<sup>1</sup>**[sergiosandoval2304@gmail.com](mailto:sergiosandoval2304@gmail.com)<https://orcid.org/0009-0003-3989-6967>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
México**Gustavo Erick Anaya Fuentes**[ganaya@uaeh.edu.mx](mailto:ganaya@uaeh.edu.mx)<https://orcid.org/0000-0002-3708-6763>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
México**Sergio Blas Ramírez Reyna**[sramirez@uaeh.edu.mx](mailto:sramirez@uaeh.edu.mx)<https://orcid.org/0000-0003-0827-7074>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
México

### RESUMEN

El balanceo de líneas de ensamble consiste en asignar tareas a las estaciones de trabajo, generando una diversidad de problemas entre las que se encuentra el Problema Simple del Balanceo de Líneas de Ensamble Tipo 2, el cual consiste en minimizar el tiempo de Ciclo. Se ha demostrado que al tratarse de un problema NP-Complejo no es factible resolver instancias con un alto número de tareas mediante Programación lineal, por lo tanto, se han propuesto diferentes heurísticos para obtener resultados próximos al óptimo. El presente documento propone un heurístico híbrido entre los metaheurísticos Recocido Simulado y Búsqueda Local Iterada de manera secuencial. Los resultados demuestran la factibilidad del algoritmo propuesto para alcanzar resultados factibles en calidad y tiempo.

**Palabras clave:** balanceo, líneas de ensamble, optimización, heurístico

---

<sup>1</sup> Autor principal.

Correspondencia: [ganaya@uaeh.edu.mx](mailto:ganaya@uaeh.edu.mx)

# Minimization of Cycle Times in the Assembly Line Balancing Problem Using a Hybrid Heuristic Approach

## ABSTRACT

Balancing assembly lines involves assigning tasks to workstations, which gives rise to various problems, including the Simple Assembly Line Balancing Problem Type 2 (SALBP-2). This problem focuses on minimizing the cycle time. It has been demonstrated that, due to its NP-Complex nature, solving instances with a large number of tasks using Linear Programming is not feasible. As a result, various heuristics have been proposed to achieve near-optimal solutions. This paper introduces a hybrid heuristic that sequentially combines the Simulated Annealing and Iterated Local Search metaheuristics. The results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm in achieving high-quality solutions within reasonable computational time.

**Keywords:** balancing, assembly lines, optimization, heuristic

*Artículo recibido 25 agosto 2025*

*Aceptado para publicación: 25 setiembre 2025*



## INTRODUCCIÓN

La primera revolución industrial inició a mediados del siglo XVIII impulsada por la innovación tecnológica llamada máquina de vapor, esto fue un parteaguas para que tanto herramientas antiguas como el trabajo impulsado por fuerza humana y animal, fortaleciendo la economía lineal que tiene como ideología un modelo de rápido consumo (Ramírez-Márquez et al., 2023).

El impulso tecnológico producido en su mayoría en Gran Bretaña revolucionó las técnicas de producción además de una gran influencia en las relaciones sociales (Elena et al., 1998).

“La inversión en capital fijo (fábricas y maquinaria) experimentó un salto tal que alteró por completo los procesos productivos del conjunto de actividades económicas, desde la agricultura al transporte, desde la minería hasta la construcción y por supuesto la industria” (Iñigo, 2012).

El éxito de la industrialización dependía del desarrollo de nuevas tecnologías que eficientizan los procesos y minimizaran los costos de producción. El sistema de producción en serie fue el más utilizado en la industria.

La producción en serie consiste en la continuidad del trabajo, donde las materias primas son mecanizadas y transportadas en cintas transportadoras, donde se pueden ir suministrando los diversos componentes a cada tipo de proceso presente en la línea, así esta se mueve a una velocidad fija.

La velocidad con que las partes se ensamblan en este sistema obligó a los proveedores a que emigraron hacia este sistema de manufactura para satisfacer las nuevas demandas (Lozano, 2005).

Un ejemplo de esta adaptación es el sistema Justo a Tiempo, que es “una filosofía industrial que consiste en la reducción de desperdicio (actividades que no agregan valor) es decir todo lo que implique subutilización en un sistema, desde la adquisición de materia prima, hasta la entrega del producto final a la siguiente célula de producción” (Pérez, 2014).

### **Ventajas de la filosofía justo a tiempo**

- Costos reducidos
- Inventario reducido
- Calidad mejorada
- Plazos de entrega cortos
- Satisfacción al cliente



Además de ventajas competitivas superiores (Yang et al., 2021).

Las técnicas que surgieron a partir de este pensamiento son tener un tiempo de entrega demasiado corto y eliminar los inventarios innecesarios (Lozano, 2005).

La única forma en que un negocio o empresa puede crecer e incrementar sus ganancias es mediante el aumento de su productividad (Niebel y Friedivaldis, 2009).

La productividad es “el grado de rendimiento con el que se emplean los recursos disponibles para alcanzar objetivos predeterminados” (Criollo, 2018) queriendo decir que el rendimiento de los recursos aumenta la productividad. Para maximizar la productividad es necesario aprovechar los recursos y minimizar el costo y tiempo de producción de artículos, lo que nos lleva a las líneas de ensamblaje.

“Las líneas de ensamble originalmente fueron diseñadas para producir grandes cantidades de un único modelo estas son ideales para las fábricas que compiten en mercados tradicionales de consumo masivo y deben elaborar altos volúmenes de bienes estandarizados, ya que permiten alcanzar altos indicadores de productividad aprovechando al máximo la utilización de los recursos (Durango et al., 2014).

(Pérez y Rojas, 2016) describe que “el problema de balancear la línea consiste en garantizar que todas las operaciones consuman las mismas cantidades de tiempo y que dichas cantidades basten para lograr la tasa de producción esperada”, (Restrepo et al., 2008) comenta que el problema de balanceo de líneas de ensamblaje (Assembly line balancing Problem) pueden ser 2 tipos, simple (simple assembly line balancing problema, SALBP) y general (General assembly line balancing problem, GALBP). El SALBP presupone que todos los parámetros se conocen, las tareas no pueden ser repartidas entre un número diferente a uno o en más estaciones de trabajo, donde hay secuencias con precedencias e incompatibilidad que se deben respetar, además de tareas que no pueden ser desarrolladas en dos o más estaciones de trabajo, en estas se establece que las estaciones están equipadas con las cualidades para realizar cualquier tarea de la secuencia en un mismo costo, así como el tiempo de proceso es independiente a la estación de trabajo.

“El problema es asignar un conjunto determinado de tareas elementales necesarios para completar un producto, se busca minimizar el número de estaciones de trabajo teniendo en cuenta precedencia, exclusión y la restricción del tiempo de ciclo “(Gurevsky et al., 2013).



En la sección 2 de este documento se describe la evolución y resultados del SALBP, en la sección 3 se plantea el problema. La sección 4 incluye la metodología, la sección 5 los resultados y discusión. Finalmente, las conclusiones se presentan en la sección 6.

### **Revisión de la literatura**

#### *Problema Simple de Balanceo de Línea de Ensamble, (SALBP)*

El SALBP organiza y asigna las tareas a cada máquina y cómo minimizar el tiempo de procesamiento del conjunto de tareas, además de minimizar el número de máquinas y estaciones empleadas (Moreno y Montealegre, 2013).

#### **Los SALBP se basa en un conjunto de supuestos limitantes como los siguientes:**

- Producción en masa de un producto homogéneo
- Todas las tareas se procesan en modo predeterminado
- La línea es estimulada con un tiempo de ciclo común fijo según la cantidad de salida deseada
- La línea se considera serie sin líneas alimentadoras ni elementos paralelos
- Con restricciones de precedencia
- Tiempos de tarea deterministas
- No hay restricciones de asignación de tareas
- Una tarea no se puede dividir entre 2 o más estaciones
- Todas las estaciones están igualmente equipadas en cuanto a máquinas y trabajadores

Casi todos estos supuestos se han relajado o modificado de alguna manera mediante diversas extensiones del modelo (Boysen et al., 2007).

Por otra parte, se distinguen 4 casos distintos de SALBP (Restrepo et al., 2008):

SALBP-1: Caracterizado por tener un tiempo de ciclo asignado y desea minimizar el número de estaciones, común cuando se puede estimar la demanda externa y una nueva línea sea montada.

SALBP-1 BBR: Es una versión que utiliza un límite de tiempo fijo que transforma el método exacto BBR (Branch, bound and remember) en una heurística (Pereira *et al.*, 2024).

SALPB-2: Parte de un número de estaciones fijo, con un supuesto de minimizar el tiempo de ciclo, generalmente es cuando la línea de ensamble ya existe.



SALBP-2S: En este se tiene en cuenta el número de tipos de máquinas que se usan en cada puesto de trabajo, se supone que (1) los trabajadores pueden trabajar en todo tipo de máquinas (2) El tiempo de los trabajadores para ejecutar una tarea en diferentes máquinas es el mismo (3) Y se supone que la eficiencia de los mismos tipos de máquinas es igual. (Pitakaso et al., 2023).

SALBP-E: Maximiza la eficiencia de la línea de ensamble, minimizando el producto del número de estaciones y tiempo de ciclo.

SALBP-F: No busca optimizar ningún valor si no que se limita a encontrar si existe una solución factible, para una solución cualquiera de tiempo de ciclo y estaciones de trabajo.

#### *Balaceo Simple de Línea de Ensamble Tipo 2 (SALBP-2)*

Los problemas de ensamblaje de línea implican la asignación óptima de tareas entre estaciones de trabajo respecto a uno o varios objetivos de rendimiento, estos son de naturaleza dura no polinomial (NP), los cuales son problemas de difícil optimización combinatoria, (Bukhari et al., 2016) propone un algoritmo heurístico para resolver un Assambley line balancing problem (ALBP) tipo 2 para la optimización de un solo objetivo para resolver el problema de Gunther, donde se cuenta con 35 tareas con 45 restricciones de precedencia, calculándolo para 6 estaciones de trabajo. Caracterizado por tener un tiempo de ciclo asignado y desea minimizar el número de estaciones, común cuando se puede estimar la demanda externa y una nueva línea sea montada. Para el caso de 6 estaciones la heurística que propone logra un tiempo de ciclo de 81 segundos, siendo este uno muy competitivo.

Se propuso una metaheurística conocida como variable neighborhood strategy adaptive search, VaNSAS (Jirasirilerd, 2020), donde este método busca en muchas áreas diferentes con la finalidad de obtener la solución más óptima para resolver un SALBP-2 en un caso de estudio de la industria de la confección, en este él considera el número y tipo de máquinas utilizadas en cada estación de trabajo, esta heurística comprende 5 pasos principales:

**Paso 1:** Generar un conjunto de pistas: Esta es utilizada para generar un conjunto de pistas en términos de un número aleatorio, una pista puede constar de 5 elementos, cada uno representa una tarea específica. Después de obtener el conjunto de respuestas inicial de números aleatorios del 0 al 1, se elige un conjunto de respuestas y es ingresado en el proceso de transformación de la pista (TTP) este se

lleva a cabo para resolver el problema del equilibrio simple de la línea de montaje donde sigue los siguientes pasos:

- Clasificar el flujo de trabajo ordenando el valor del elemento de pista.
- Asignar pasos de trabajo a la estación de trabajo sin contradecir las condiciones de secuencia de relaciones laborales además de no exceder el tiempo de ciclo.
- Definir el tipo de máquina de cada paso para la estación de trabajo, de forma que solo 1 estación de trabajo tenga 1 solo tipo de máquina.

**Paso 2:** Hacer que todas las pistas funcionen en una caja negra especificada: Esto es elegir el método de búsqueda de respuestas diseñado para encontrar la respuesta óptima a cada problema, aquí Ganokgarn diseñó el algoritmo para ser utilizado por 3 cajas negras incluyendo un algoritmo de evolución diferencial (DEA), un método de búsqueda local iterada (ILS) y un método de intercambio (Swap). La pista selecciona una caja negra a partir de números aleatorios 0-1, con una probabilidad de seleccionar una caja negra igual a 0.33

**Paso 3.** Operar la caja negra: Se elige el método de búsqueda de respuestas de forma aleatoria

**Paso 4.** Actualizar la pista: Toda la información es actualizada con un par de ecuaciones

**Paso 5.** Repetir los pasos 2do a 4to hasta que se cumpla la condición de terminación: El criterio fue el máximo de iteraciones que en este estudio fue de 500 iteraciones.

El algoritmo fue codificado y simulado en Visual Studio C#, comparándolo con el software LINGO. Encontrando resultados superiores a los conocidos con el programa LINGO, proporcionando una mejor solución y en un tiempo computacional menor, comparando 2382 min en LINGO contra 1.23 con VaNSAS, además de una eficiencia en la línea de montaje 70.3% superior. Los resultados obtenidos fueron un total de 23 estaciones de trabajo con un tiempo de ciclo de 2 min.

Se aplicó un algoritmo metaheurístico en un problema para aumentar la eficiencia de producción y la reducción de costos de producción en la industria de las prendas de vestir (camisa de manga corta masculina) como estrategia para obtener una ventaja competitiva basado en el Sistema de Producción Toyota (TPS) como distintivo este método incorpora el dominio de las habilidades de diferentes

trabajadores, las rutas de los trabajadores no pueden cruzar en cada subcelda y algunos procesos no se clasifican como multitarea (Cheng et al., 2021).

El algoritmo utilizado se llama Algoritmo Codicioso Constructivo (CG), TS y SA., que fueron desarrollados en Java, simulados en un entorno de desarrollo integrado. Para este caso solo se cambiaron las asignaciones de mano de obra, centrados en minimizar el tiempo de ciclo.

Se abordó el problema de investigación del equilibrio de la línea de montaje de 2 caras (2S-ALB) (Muhammad et al., 2017).

**Las ventajas de la aplicación del anterior son las siguientes:**

- Acorta la línea de montaje
- Ahorra algunos espacios en las líneas de montaje
- Reduce el costo de herramientas y accesorios
- Reduce el tiempo de producción
- Reduce la manipulación de materiales

En base a estas ventajas se plantea que se tiene la capacidad para maximizar la productividad de las líneas de montaje. Dentro de su trabajo menciona 3 algoritmos que se han utilizado en la literatura para resolver problemas 2S-ALB:

**Algoritmo Genético**

Introducido en la década de 1970 en la Universidad de Michigan por John Holland (Keun et al., 2000), proporciona la mejor secuencia del proceso de ensamblaje dentro de las posibles secuencias restringidas o no restringidas. El algoritmo comienza con un conjunto de soluciones (representadas por cromosomas) llamadas población. Se toman soluciones de una población y se utilizan para formar una nueva población. Esto está motivado por la esperanza de que la nueva población sea mejor que la anterior. Las soluciones que se seleccionan para formar nuevas soluciones (descendencia) se seleccionan de acuerdo con su aptitud: cuanto más adecuadas son, más posibilidades tienen de reproducirse. Este proceso se repite hasta que se satisfacen algunas condiciones (mejora de la mejor solución).

## Optimización de colonia de hormigas

Introducido en los 90's (Blum, 2005), inspirado en el comportamiento de una colonia de hormigas que encuentra un camino entre la fuente de alimento y su hormiguero, se seguirá el rastro de las feromonas liberadas por otras hormigas, cada hormiga saldrá por un camino diferente, las que elijan el camino más corto regresan al hormiguero más rápido, por lo tanto el rastro de feromonas será mayor que en los demás caminos, así esta trayectoria corta y más usada se considera la solución en el algoritmo.

**Recocido simulado** aplica por primera vez esta heurística en 1983 para resolver una optimización combinatoria, inspirado en el proceso de recocido de la metalurgia, calentamiento y enfriamiento para alterar las propiedades físicas debido a los cambios de la estructura interna, generalmente da una ejecución temprana antes de una solución óptima (Özcan, 2010).

Finalmente considera que la hibridación de un método algorítmico también puede mejorar el problema de la línea de ensamblaje.

Para resolver el problema de balanceo de línea de ensamblaje tipo 2 con un límite en el número de tipos de máquinas en una estación de trabajo particular (SALBP-2S) de máquinas en una estación de trabajo particular (SALBP-2S) compuesto de 2 pasos (Pitakaso et al., 2023):

- Genera un conjunto de pistas iniciales y,
- El proceso de recorrido de pistas

Donde modifica tres métodos de caja negra con respecto a la versión original:

- Algoritmo de evolución diferencial modificada (MDE).
- Búsqueda de vecindad grande (LNS).
- Intercambio de tiempos de procesamiento más corto (STP-SWAP).

Estos métodos fueron probados en 4 grupos de instancias de prueba, dando como resultado que VaN-SAS supera las heurísticas más conocidas llamadas Iterative Beam Search (IBS), encontrando el 98.4% de soluciones óptimas en 128 instancias de prueba mientras que IBS puede encontrar 95.3%.

Extendido a problemas SALBP-2S se descubrió que el tiempo de ciclo aumentó en un 6.826% y un 11.302% en promedio, VaN-SAS fue capaz de reducir el tiempo de ciclo a 1.23 minutos y aumentar la efectividad de la línea de ensamble en un 70.36%.



Se presentó un método de optimización para líneas de montaje en tipo U, donde desarrolla un algoritmo híbrido que incluye un algoritmo exacto para encontrar una solución inicial y un algoritmo metaheurístico de agrupación para mejorar la solución (Pourmomen et al., 2021).

Luego, el algoritmo propuesto se codifica y resuelve mediante el software MATLAB, y luego utilizando los problemas estándar considerados en (Wang et al., 2008) se mide la calidad del método propuesto. Los resultados ilustran que el algoritmo propuesto es uno de los más eficientes para resolver este tipo de problemas.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Problema Simple de Balanceo de Líneas de Ensamble Tipo 2 consiste en minimizar el tiempo de ciclo considerando un número de estaciones de trabajo predeterminado. El modelo matemático puede definirse de la siguiente manera:

$$\text{Min } C \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N t_i * X_{ij} \leq C \quad j = 1, \dots, M \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^M X_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^M j * X_{kj} \leq \sum_{j=1}^M j * X_{ij} \quad \forall k < i \quad (4)$$

$$X_{ij} = \{0,1\} \quad \forall (i,j); C \in R^+ \quad (5)$$

En (1) se establece la función objetivo con la intención de minimizar el tiempo de ciclo. En (2) se limita el uso del tiempo de cada estación de trabajo a un tiempo máximo igual al tiempo de Ciclo C. La restricción (3) asegura que cada tarea sea asignada únicamente a una estación de trabajo independientemente de la que esta sea.

El problema requiere cumplir con las restricciones de precedencia, para esto la ecuación (4) asegura que se ejecuten las tareas que cumplen con la precedencia preestablecida. Finalmente, la ecuación (5) define a las variables binarias.

## METODOLOGÍA

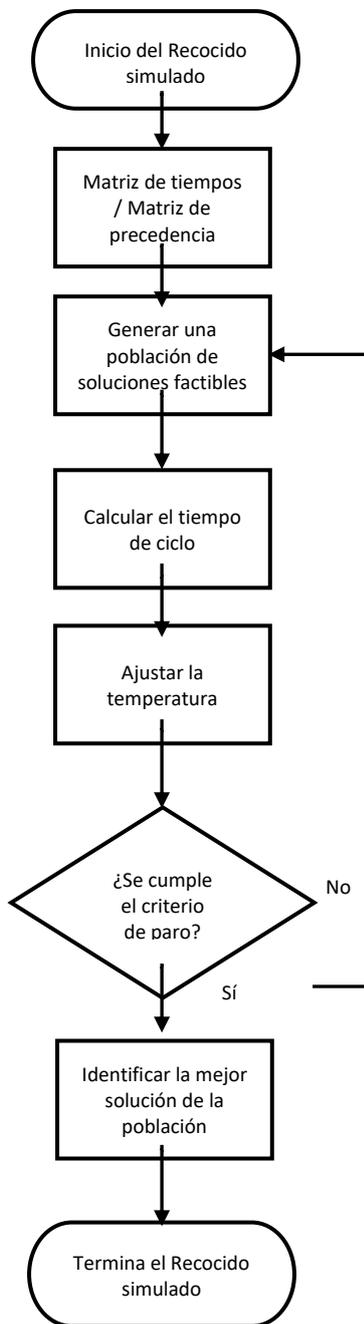
El algoritmo híbrido propuesto consiste en el uso encadenado de los heurísticos Recocido Simulado y Búsqueda Local. El procedimiento es el siguiente:

1. De la instancia a resolver se debe identificar la matriz de tiempos y la matriz de precedencias.
2. Iniciar con el recocido simulado definiendo la temperatura como el tamaño de población.
3. Generar soluciones para la primera generación.
4. Calcular el tiempo de ciclo de cada elemento de la población.
5. Revisar el criterio de paro, es decir, el número de iteraciones, si se cumple continúa con el paso 6, de lo contrario se actualiza la temperatura y se regresa al paso 3.
6. Tomar la solución del paso 5 para comenzar con la búsqueda local de acuerdo con un tamaño de almacenamiento llamado Pila predeterminado.
7. Evaluar el tiempo de ciclo de cada solución.
8. Generar una nueva solución fuera de la Pila y calcular el tiempo de ciclo.
9. Si la nueva solución es mejor que alguna de la Pila se elimina la correspondiente a la Pila y en su lugar entra la nueva; de lo contrario, la Pila no se modifica.
10. Se verifica el criterio de paro (número de iteraciones). Si el criterio de paro no se cumple se debe regresar al paso 8 de lo contrario se determina a la mejor solución de la Pila y se reporta como la solución del algoritmo.

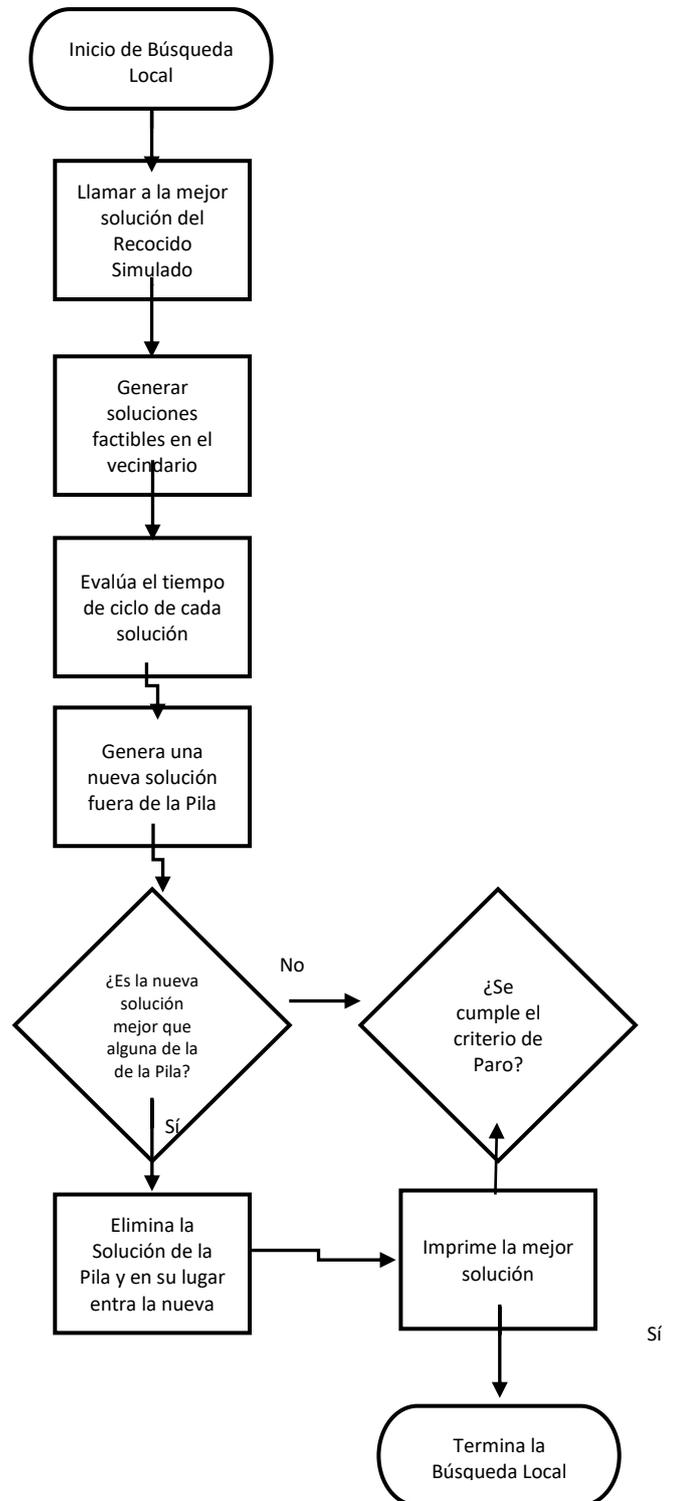
Los pasos 1 al 5 son referentes al recocido simulado, el diagrama de flujo de la Figura 1, detalla el procedimiento, mientras que la Figura 2 muestra el proceso de la Búsqueda Local.



**Figura 1.** Diagrama de flujo del algoritmo Recocido Simulado



**Figura 2.** Diagrama de flujo del algoritmo Búsqueda Local



El algoritmo propuesto se probó en instancias de bases de datos de la literatura. Los resultados se muestran en la siguiente sección.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante las experimentaciones computacionales fue posible construir la tabla comparativa que se muestra a continuación:

Tabla Comparativa de instancias y su comportamiento simulado en diferentes algoritmos

**Tabla 1.** Comparativa de instancias en diferentes algoritmos

| Instancia (ns) | Algoritmo BS-BDP | Algoritmo RK-GA | Algoritmo propuesto |
|----------------|------------------|-----------------|---------------------|
| Arcus2(19)     | 7922             | 7921            | 7921                |
| Arcus2(20)     | 7523             | 7523            | 7524                |
| Arcus2(21)     | 7186             | 7184            | 7184                |
| Arcus2(22)     | 6856             | 6859            | 6856                |
| Arcus2(23)     | 6560             | 6559            | 6560                |
| Arcus2(24)     | 6290             | 6286            | 6282                |
| Arcus2(25)     | 6118             | 6108            | 6101                |
| Arcus2(26)     | 5860             | 5864            | 5855                |
| Mukherje(20)   | 220              | 221             | 220                 |
| Barthol2(50)   | 86               | 85              | 85                  |

Se realizó un análisis estadístico comparativo para pruebas no paramétricas debido al número de muestras recolectadas, por lo anterior, la prueba de Kruskal-Wallis es una de las más apropiadas y la utilizamos para evaluar los resultados del algoritmo propuesto.

**Figura 3.** Método de prueba de valor P

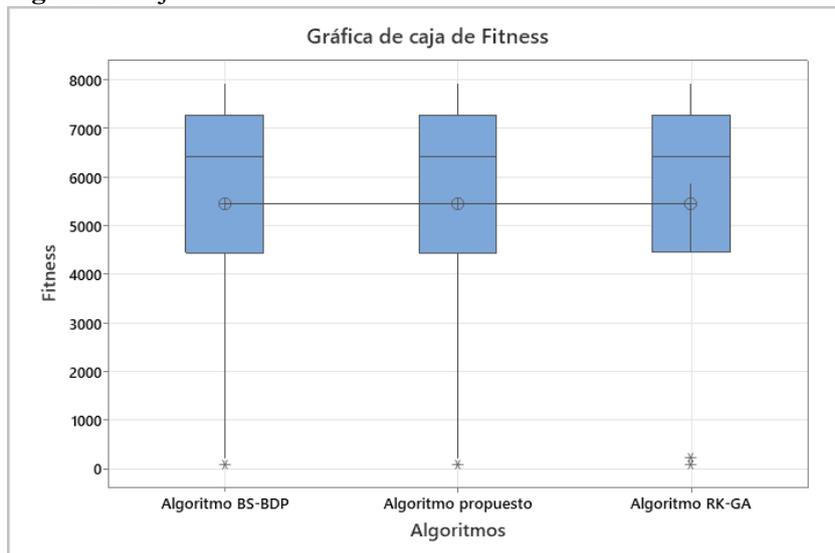
| <b>Prueba</b>            |   |         |         |
|--------------------------|---|---------|---------|
| Hipótesis nula           | $H_0$ : Todas las medianas son iguales    |         |         |
| Hipótesis alterna        | $H_1$ : Al menos una mediana es diferente |         |         |
| Método                   | GL  | Valor H | Valor p |
| No ajustado para empates | 2   | 0.04    | 0.980   |
| Ajustado para empates    | 2   | 0.04    | 0.980   |

Utilizando el método del Valor P para decidir, el Valor P ajustado para empates toma un valor de 0.98 mientras que el nivel de significancia factible más grande a utilizar es de 0.1; al ser el Valor P mayor que el nivel de significancia la hipótesis nula se acepta, esto implica que no existe una diferencia

significativa entre los algoritmos de la literatura y el algoritmo propuesto en el presente documento.

Adicionalmente se graficaron los resultados para comparar la eficiencia de los algoritmos como se muestra en la figura:

**Figura 4.** Caja de Fitness



## CONCLUSIONES

El presente estudio propuso un enfoque heurístico híbrido que integra de manera secuencial las metaheurísticas de Recocido Simulado (SA) y Búsqueda Local Iterada (ILS) para abordar el Problema Simple de Balanceo de Líneas de Ensamble Tipo 2 (SALBP-2), el cual se centra en minimizar el tiempo de ciclo para un número predeterminado de estaciones de trabajo. El algoritmo propuesto fue evaluado utilizando instancias de prueba estándar de la literatura, y su rendimiento fue comparado con métodos establecidos como BS-BDP y RK-GA.

Los resultados computacionales demuestran la viabilidad y efectividad del algoritmo híbrido propuesto. En varias instancias, notablemente Arcus2(24), Arcus2(25) y Arcus2(26), el algoritmo logró tiempos de ciclo competitivos y, en algunos casos, marginalmente superiores en comparación con los métodos alternativos. Esto indica que la combinación secuencial de SA, que facilita una exploración amplia del espacio de soluciones, con ILS, que intensifica la búsqueda en regiones prometedoras, puede producir soluciones de alta calidad. El algoritmo navega con éxito el panorama complejo de soluciones del SALBP-2, un problema NP-difícil donde los métodos exactos son computacionalmente prohibitivos

para instancias a gran escala.

Para validar estadísticamente el rendimiento, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis, seguida de un análisis del Valor P. El Valor P ajustado para empates resultante fue de 0.98, que excede significativamente el nivel de significancia convencional de 0.1. Esta evidencia estadística lleva a la aceptación de la hipótesis nula, confirmando que no existe una diferencia significativa en el rendimiento entre el algoritmo híbrido propuesto y los algoritmos existentes en la literatura. Por lo tanto, se puede concluir que el método propuesto produce soluciones de una calidad y eficiencia comparables a las de las heurísticas establecidas.

En conclusión, la contribución principal de esta investigación radica en el desarrollo y validación de un marco de trabajo metaheurístico híbrido y robusto para el SALBP-2. El algoritmo demuestra ser una alternativa factible y eficiente para obtener soluciones cercanas al óptimo dentro de un tiempo computacional razonable. Si bien el análisis estadístico muestra paridad en lugar de superioridad, la consistencia de los resultados subraya la confiabilidad del enfoque. Trabajos futuros podrían explorar la adaptación de este marco híbrido a variantes más complejas del balanceo de líneas de ensamble, como aquellas que consideran tiempos de tarea estocásticos o líneas en forma de U, e investigar el ajuste fino de sus parámetros para mejorar aún más su rendimiento.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- Blum, D. (2005). Ant colony optimization theory: a survey. *Theor Comput Sci*, (2-3), 243-278.
- Boysen, N., Fliedner, M., y Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*.
- Bukhari, P., Ahmed, R., y Umer, M. (2016). A Heuristic Approach for Type 2 Assembly Line Balancing Problem. *Applied Mechanics and Materials*, 1-5.
- Cheng, L.-J., Ping-Shung, C., Jr-Fong, D., Sung-Lien, K., y Li-Jen, C. (2021). Applying Meta-Heuristics Algorithm to Solve Assembly Line Balancing Problem with Labor Skill Level in Garment Industry. *Atlantis Press*, 1-13.
- Criollo, R. (2018). *Estudio del Trabajo, Ingeniería de métodos y medición del trabajo*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.



- Durango, L. F., Orejuela, J. P., y Ortíz, A. (2014). Balance horizontal de líneas de ensamble para modelos mixtos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 3.
- Elena, A., Ordóñez, J., y Columbi, M. (1998). *Después de Newton: ciencia y sociedad durante la Primera Revolución Industrial*. Anthropos Editorial.
- Gurevsky, E., Hazir, O., Battaia, O., y Dolgui. (2013). Robust balancing of straight assembly lines with interval task times. *Journal of the Operational Research Society*, 2.
- Iñigo, L. E. (2012). *Breve historia de la revolución industrial*. Nowtilus.
- Jirasirilerd, G. (2020). Simple assembly line balancing problem type 2 by variable neighborhood strategy adaptive search: A case study garment industry. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2-21.
- Keun, Y., Kim, Y., y Kim, Y. J. (2000). Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. *Prod Plan Control* 11, 44-53.
- Lozano, L. G. (2005). *Diseño de línea de manufactura mediante la metodología de técnica de flujo por demanda para los productos quick tach y lower link components del mini cargador frontal*. (Tesis de Posgrado). Universidad Autónoma del Estado de Nuevo León, Nuevo León.
- Moreno, J. D., y Montealegre, L. M. (2013). *Problema de Balance de línea con múltiples líneas en paralelo y enfoque multiobjetivo*. (Tesis de licenciatura). Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Muhammad, A. M., Mohd, F. R., y Muhamad, R. (2017). A review of two-sided assembly line balancing problem. *Int J Adv Manuf Technol*.
- Niebel, B., y Friedvaldis, A. (2009). *Ingeniería Industrial, Métodos, estándares y diseño de trabajo*. México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Özcan, U. (2010). Balancing stochastic two-sided assembly lines: a chance-constrained, piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm. *Eur J Oper Res*, 81-97.
- Pereira, J., Vilà, M., y Álvarez, E. (2024). A branch, bound and remember algorithm for maximizing the production rate in the simple assembly line balancing problem. *Computers & Operations Research*, 5.



- Pérez, A., y Rojas, A. (2016). Evaluación, mejora y diseño de una estación de trabajo en una industria maquiladora del clúster automotriz. (Tesis de Licenciatura). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, Ensenada B.C.
- Pérez, J. (2014). Just in time aplicado en la industria de la construcción. (Tesina para especialidad). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Pitakaso, R., Sethanan, K., Jirasiriled, G., y Goliska-Dawson, P. (2023). A novel variable neighborhood strategy adaptive search for SALBP-2 problem with a limit on the number of machine's types. *Ann Oper Res*, 1-2, 22-25.
- Pourmomen, P., Mahmound, A. W., y Mazyar, N. (2021). Optimizing the first type of U-shaped assembly line balancing problems. *Annals of Optimization Theory and Practice*, 2, 15.
- Ramírez-Márquez, C., Ponce Ortega, J. M., y Segovia Hernández, J. G. (2023). Industria 4.0 Camino hacia una economía circular.
- Restrepo, J. H., Medina, P. D., y Cruz, E. A. (2008). Assembly balancing line problem SALBP-1 and SALBP-2: a case of study. *Scientia et Technica Año XIV*, 1-2.
- Wang, R., Katayama, H., y Gen, M. (2008). U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 637-4649.
- Yang, J., Xie, H., Yu, G., y Liu, M. (2021). Achieving a just-in-time supply chain: The role of supply chain intelligence. *International Journal of Production Economics*, 1.

