

**Nueva metodología matricial para la
transparencia algorítmica en el equilibrado
de líneas de ensamblaje utilizando
algoritmos genéticos**

Juan Ignacio Anel Gracia



UNIVERSITAT DE VIC
UNIVERSITAT CENTRAL
DE CATALUNYA

**Nueva metodología matricial para la
transparencia algorítmica en el equilibrado
de líneas de ensamblaje utilizando
algoritmos genéticos**

Autor: Juan Ignacio Anel Gracia.

Directores de tesis: Dr. Pau Català Calderón y Dr. Moisés Serra Serra.

Programa de doctorado: Ciencias experimentales y tecnologías.

25 de Abril del 2022



UNIVERSITAT DE VIC
UNIVERSITAT CENTRAL
DE CATALUNYA

Agradecimientos

Esta tesis no hubiera sido posible sin la eterna inspiración de Leticia, los consejos de Ana Carmen, el espíritu crítico de José, el constante apoyo de Silvia y la responsabilidad motivada por mis hijos, Jan e Izan.

Reconocer también la imprescindible y magnífica labor de mis directores de tesis, Pau y Moisés.

Resumen

Esta tesis propone mejoras en el uso de los algoritmos de optimización para resolver el problema del equilibrado de las líneas de ensamblaje por parte de pequeñas y medianas empresas (pymes).

El personal encargado de enfrentarse a la industrialización de un nuevo catálogo de productos, como los ingenieros de procesos, deben diseñar los procesos de fabricación industrial para lograr el equilibrado de dicha línea de ensamblaje. El problema del equilibrado de una línea de ensamblaje consiste en asignar las tareas necesarias para el ensamblaje de todo el catálogo de productos a las estaciones de trabajo de la línea, respetando una serie de restricciones como, por ejemplo, las de precedencia de las tareas de ensamblaje. El resultado del equilibrado tiene que satisfacer criterios de eficiencia productiva, habitualmente minimizar el número de estaciones de trabajo o minimizar el tiempo de ciclo.

Para la resolución del problema del equilibrado de líneas de ensamblaje con un catálogo de productos con múltiples referencias, se utilizan técnicas propias de la investigación operativa, como son la resolución por algoritmos de optimización y, más concretamente, los algoritmos genéticos, implementados en programas informáticos específicos.

Se ha detectado, tanto en la bibliografía científica especializada consultada como en una encuesta realizada a 38 ingenieros de procesos de pymes como por la experiencia de 25 años del autor de esta tesis como ingeniero de procesos, que el uso de estos algoritmos de optimización no es habitual en la mayoría de las pymes, si bien es conocido que el uso de estas técnicas ayudar a organizar y equilibrar sus líneas de ensamblaje.

Para facilitar la implementación del uso de algoritmos de optimización entre las pymes, esta tesis desarrolla una nueva metodología matricial a aplicar conjuntamente con un algoritmo de optimización como los algoritmos genéticos, para diseñar líneas de ensamblaje nuevas,

clasificadas como de modelos mixtos y objetivo único de tipo 2, conocidas con las siglas en inglés de MMALB type 2, Mixed Model Assembly Line Balancing type 2.

La hipótesis inicial de la tesis es que es posible mejorar la transparencia algorítmica de los resultados obtenidos en el equilibrado de una línea de ensamblaje, por medio de la preparación previa del modelo matemático del problema y posterior organización de los resultados en base a la nueva metodología matricial propuesta. El resultado es una modelización de la línea de ensamblaje que permite una mejor comprensión de los factores que influyen en la solución proporcionada por un algoritmo genético.

El objetivo principal de la nueva metodología es lograr una mejor transparencia algorítmica respecto a las técnicas propuestas en la bibliografía especializada. La transparencia algorítmica se define como la facilidad de entender o interpretar la influencia de los factores que regulan el funcionamiento de resolución de los algoritmos de optimización. En la bibliografía especializada no se han encontrado trabajos que se centren en la mejora de la transparencia algorítmica.

La nueva metodología matricial, respecto a otros métodos de resolución analizados en la bibliografía, permite reducir el costo computacional en casos con un gran número de referencias de producto, además de que se puede implementar mediante programas informáticos tipo hoja de cálculo, de uso habitual en las pymes.

La nueva metodología matricial propuesta se ha validado a través de su aplicación en un caso de estudio basado en la industria, que es paradigmático para 38 pymes entrevistadas asociadas a la organización CEAM-Metal.

Resum

Aquesta tesi s'emmarca en plantejar millores en l'ús d'algorismes d'optimització per resoldre el problema de l'equilibratge de les línies de muntatge per part de petites i mitjanes empreses (pimes).

El personal encarregat de la industrialització d'un nou catàleg de productes, com els enginyers de processos, han de dissenyar els processos de fabricació industrial per aconseguir l'equilibrat de la línia de muntatge. El problema de l'equilibrat d'una línia de muntatge consisteix a assignar les tasques necessàries per al muntatge de tot el catàleg de productes a les estacions de treball de la línia, respectant una sèrie de restriccions com les de precedència entre les tasques de muntatge. El resultat de l'equilibratge ha de complir amb criteris d'eficiència productiva, com minimitzar el nombre d'estacions de treball o minimitzar el temps de cicle.

Per a resoldre el problema de l'equilibratge de línies de muntatge d'un catàleg de productes amb múltiples referències, s'utilitzen tècniques pròpies de la investigació operativa, com són la resolució per algorismes d'optimització i més concretament els algorismes genètics, implementats en programes informàtics específics.

S'ha detectat tant a la bibliografia científica especialitzada consultada, com en una enquesta realitzada a 38 enginyers de processos de pimes, com per l'experiència de 25 anys de l'autor d'aquesta tesi com a enginyer de processos, que l'ús d'aquests algorismes d'optimització no és habitual a la majoria de les pimes, tot i reconèixer que l'ús d'aquestes tècniques ajudaria a organitzar i equilibrar les línies de muntatge.

Per facilitar la implementació de l'ús d'algorismes d'optimització entre les pimes, aquesta tesi desenvolupa una nova metodologia matricial a aplicar conjuntament amb un algoritme d'optimització com poden ser els algorismes genètics, per dissenyar línies de muntatge noves, classificades com de models mixtos i objectiu únic de tipus 2, conegudes amb les sigles en anglès de MMALB type 2 (Mixed Model Assembly Line Balancing type 2).

La hipòtesi inicial de la tesi és que és possible millorar la transparència algorítmica dels resultats obtinguts en l'equilibrat d'una línia de muntatge, per mitjà de la preparació prèvia del model matemàtic del problema i posterior organització dels resultats en base a la metodologia matricial proposta. El resultat és una modelització de la línia de muntatge que permet una millor comprensió dels factors que influeixen en la solució proporcionada per un algorisme genètic.

L'objectiu principal de la nova metodologia és aconseguir una millor transparència algorítmica respecte a les tècniques proposades a la bibliografia especialitzada. La transparència algorítmica es defineix com la facilitat d'entendre o interpretar la influència dels factors que regulen el funcionament de la resolució dels algorismes d'optimització. A la bibliografia especialitzada no s'han trobat treballs que se centrin en la millora de la transparència algorítmica.

La nova metodologia matricial, respecte a altres mètodes de resolució analitzats a la bibliografia, permet reduir el cost computacional en casos amb un gran nombre de referències de producte, a més que es pot implementar en programes informàtics tipus fulla de càlcul, d'ús habitual a les pimes.

La nova metodologia matricial s'ha validat a través de la seva aplicació en un cas d'estudi basat en la indústria, que és paradigmàtic per a 38 pimes entrevistades associades a l'organització CEAM-Metal.

Abstract

This thesis is part of proposing improvements in the use of optimization algorithms to solve the problem of balancing assembly lines by small and medium enterprises (SMEs).

The personnel in charge of facing the industrialization of a new catalog of products, such as process engineers, must design the industrial manufacturing processes to achieve the balance of said assembly line. The problem of balancing an assembly line consists of assigning the tasks necessary for the assembly of the entire product catalog to the workstations of the line, respecting a series of restrictions such as the precedence of the assembly tasks. The result of the balancing has to satisfy productive efficiency criteria, such as minimizing the number of work stations or minimizing the cycle time.

To solve the problem of balancing assembly lines with a catalog of products with multiple references, techniques from operations research are used, such as resolution by optimization algorithms and more specifically genetic algorithms, implemented in specific computer programs.

It has been detected both in the specialized scientific literature consulted, and in a survey of 38 process engineers from SMEs, as well as by the 25-year experience of the author of this thesis as a process engineer, that the use of these optimization algorithms does not It is common in most SMEs, although the use of these techniques is known to help organize and balance their assembly lines.

To facilitate the implementation of the use of optimization algorithms among SMEs, this thesis develops a new matrix methodology to be applied together with an optimization algorithm such as genetic algorithms, to design new assembly lines, classified as mixed and objective models. single type 2, known by the acronym in English MMALB type 2, Mixed Model Assembly Line Balancing type 2.

The initial hypothesis of the thesis is that it is possible to improve the algorithmic transparency of the results obtained in the balancing of an assembly line, through the prior preparation of the mathematical model of the problem and subsequent organization of the results based on the matrix methodology. proposal. The result is an assembly line modeling that allows a better understanding of the factors that influence the solution provided by a genetic algorithm.

The main objective of the new methodology is to achieve better algorithmic transparency with respect to the techniques proposed in the specialized bibliography. Algorithmic transparency is defined as the ease of understanding or interpreting the influence of the factors that regulate the resolution performance of optimization algorithms. In the specialized bibliography, no works have been found that focus on improving algorithmic transparency.

The new matrix methodology, with respect to other resolution methods analyzed in the bibliography, allows to reduce the computational cost in cases with a large number of product references, in addition to the fact that it can be implemented through spreadsheet-type computer programs, commonly used in the pymes.

The new matrix methodology has been validated through its application in an industry-based case study, which is paradigmatic for 38 interviewed SMEs associated with the CEAM-Metal organization.

Tabla de contenido

Resumen.....	7
Resum.....	9
Abstract	11
Tabla de contenido	13
Índice de figuras.....	16
Índice de tablas.....	17
Glosario	18
Capítulo 1. Introducción y Objetivos	21
1.1. Motivación y justificación	21
1.2. Objetivos.....	22
1.3. Estructura de la tesis	24
Capítulo 2. Estado del arte.....	25
2.1. La línea de ensamblaje.....	25
2.2.1. Diseño de una línea de ensamblaje para la industrialización de un catálogo de productos y su ciclo de vida.....	26
2.2.2. Tipos de líneas de ensamblaje.....	27
2.2. El Problema del equilibrado de líneas de ensamblaje.....	35
2.3. Metodologías de resolución del problema de equilibrado de líneas de ensamblaje	37
2.4. La transparencia algorítmica en los algoritmos de optimización.....	42

2.5.	El marco Organizativo industrial en las pymes.	43
2.5.1.	Lean Manufacturing	43
2.5.2.	Ingeniería concurrente.....	45
2.5.3.	Diseño de producto modular-funcional.....	46
2.6.	Encuesta a pymes sobre el equilibrado de sus líneas de ensamblaje	48
2.7.	Conclusiones de la revisión del estado del arte	50
Capítulo 3. Nueva metodología matricial para mejorar la transparencia algorítmica		
53		
3.1.	Definición del problema de estudio	53
3.1.1.	Cálculo del número de estaciones de trabajo.....	57
3.1.2.	Función objetivo y restricciones	58
3.2.	Nueva metodología matricial.....	59
	Paso 1. Recopilación de datos del catálogo de productos.....	62
	Paso 2. Simplificación de la matriz A.....	63
	Paso 3. Definición de la matriz B de tareas de ensamblaje y del número de estaciones de trabajo	67
	Paso 4. Resolución del modelo	73
	Paso 5. Análisis del modelo	76
Capítulo 4. Aplicación de la nueva metodología matricial a un ejemplo.....		
4.1.	Descripción del ejemplo paradigmático.....	79
4.2.	Planteamiento y resolución con solo un AG	86

4.1.1. Planteamiento con sólo un AG.....	86
4.2.1. Resolución con sólo un AG	88
4.3. Planteamiento y resolución con un AG y la nueva metodología matricial	91
4.3.1. Planteamiento con un AG y la nueva metodología matricial.....	91
4.2.2. Resolución con un AG y la nueva metodología matricial.....	96
4.4. Ventajas aportadas del uso de un AG con la nueva metodología matricial	101
4.4.1. Transparencia algorítmica para analizar futuras modificaciones de la línea de ensamblaje.....	101
4.4.2. Transparencia algorítmica mejorada para la detección de los desequilibrios sistémicos de la línea de ensamblaje.....	103
4.4.3. Nuevas referencias de producto equilibradas por defecto	104
4.4.4. Resolución automatizada y rápida	106
Capítulo 5. Conclusiones, propuestas de investigación futuras y contribuciones...	111
Anexo 1: Archivo Excel simplificado para testeo.....	115

Índice de figuras.

Fig. 1. Etapas de optimización durante el ciclo de vida de la línea de ensamblaje.	27
Fig. 2. Línea de transferencia síncrona	28
Fig. 3. Línea de transferencia asíncrona	28
Fig. 4. Línea de transferencia continua	29
Fig. 5. Líneas de ensamblaje según la distribución espacial de las estaciones de trabajo	31
Fig. 6. Línea de ensamblaje de un único modelo SAL	31
Fig. 7. Línea de ensamblaje con mezcla de modelos. MMAL	32
Fig. 8. Línea de ensamblaje con múltiples modelos. MuMAL.....	32
Fig. 9. Sistemas de transporte fijo (a) y móvil (b)	33
Fig. 10. Clasificación de ALBs por Kamal et al. (2011).....	35
Fig. 11. Metodologías de equilibrado de procesos Kamal et al. (2011).....	38
Fig. 12. Resultados encuesta.....	49
Fig. 13. Disposición línea de ensamblaje donde aplicar la metodología matricial.....	56
Fig. 14. Diagrama de la nueva metodología matricial	61
Fig. 15. Diagrama de precedencia de tareas de ensamblaje.....	83
Fig. 16. Gráfico computacional comparativo con el algoritmo genético estándar	108
Fig. 17 Archivo Excel del ejemplo paradigmático.....	115
Fig. 18. Ventana de parámetros de solver	116
Fig. 19. Archivo Excel tras la resolución.....	117

Índice de tablas

Tabla 1. Información inicial a definir para el diseño de una nueva línea de ensamblaje.....	26
Tabla 2. Catálogo de productos a ensamblar: el vehículo y sus variantes López et al. (2015)	80
Tabla 3. Tareas de ensamblaje y tiempos de operación individuales.....	82
Tabla 4. Asignación inicial de las tareas de ensamblaje a las estaciones de trabajo.....	84
Tabla 5. Datos del ejemplo.....	85
Tabla 6. Tareas de ensamblaje y su ocurrencia en las referencias de producto.	87
Tabla 7. Localización óptima de las tareas de ensamblaje en las estaciones de trabajo	89
Tabla 8. Tiempos totales de operación por referencia de producto de tareas de ensamblaje por estación y agregado.....	89
Tabla 9. Matriz A.	91
Tabla 10. Nueva matriz A después de agrupar vectores coincidentes.....	92
Tabla 11. Nueva matriz A después de identificar los vectores complementarios.	93
Tabla 12. Matriz B.	95
Tabla 13. Valor de los vectores d_w	97
Tabla 14. Explicación del funcionamiento de la matriz TWF'	100
Tabla 15. Efectos alternativos de agregar una nueva tarea de ensamblaje a la funcionalidad del producto 7.	102
Tabla 16. Nueva referencia de producto a fabricar la línea de ensamblaje.....	105
Tabla 17. Tiempos de estación de trabajo (min) por referencia de producto después de agregar una nueva.	106
Tabla 18. Dimensiones M y F de los ejemplos evaluados.	107
Tabla 19. Comparación de los métodos de equilibrio encontrados en las pymes.....	110

Glosario

A: matriz de referencias de productos y funcionalidades del producto

B: matriz de tareas de ensamblaje

c : capacidad diaria necesaria requerida por el cliente de los productos fabricados

C_m : variable de tiempo de ciclo para cada referencia de producto m .

c_s : coeficiente de seguridad aplicado a partir de los valores históricos de eficiencia de las líneas de ensamblaje.

chrom_{1..N} : cromosoma a iterar para optimizar la asignación de tareas de ensamblaje a las estaciones de trabajo.

d_w : vector fila de dimensión N con la asignación de operaciones para cada estación de trabajo.

d_{wn} : variables de asignación de las tareas de ensamblaje n a las estaciones de trabajo w .

F : número de posibles funcionalidades del producto ($f = 1, 2, \dots, F$)

M : número de referencias de productos incluidas en el catálogo de productos a ensamblar ($m = 1, 2, \dots, M$).

N : número de tareas de ensamblaje ($n = 1, 2, \dots, N$).

p_{rs} : variable de precedencia entre tareas.

T: matriz diagonal cuadrada de dimensiones $N \cdot N$ que contiene en la diagonal los tiempos de operación individuales (t_n)

$t_{c\ max}$: la mayor suma de tiempos de operación de las tareas de ensamblaje posible para cualquiera de las referencias de productos

t_n : tiempo de una tarea de ensamblaje individual; ($n = 1, 2, \dots, N$)

t_i : *takt time*, cadencia de fabricación requerida por el cliente.

t_w : tiempo de trabajo para todos los turnos disponible para cada estación de trabajo.

TWF: matriz de tiempos de operación asignado de ensamblar la funcionalidad del producto f a la estación de trabajo w

TWF': matriz de tiempos de operación asignado de ensamblar la funcionalidad del producto f a la estación de trabajo w incluyendo el tiempo mínimo entre funcionalidades de producto complementarias.

twf_{wf} : suma de tiempos de asignación de la funcionalidad.

twf'_{wf} : suma de tiempos de asignación de la funcionalidad incluyendo el tiempo mínimo entre funcionalidades de producto complementarias.

W : número de estaciones de trabajo ($w = 1, 2, \dots, W$).

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.Motivación y justificación

El problema del equilibrado de líneas de ensamblaje (ALBP, acrónimo en inglés de Assembly Line Balancing Problem) consiste en el reparto de tareas entre las estaciones de trabajo, respetando una serie de restricciones y objetivos productivos que permitan evaluar su eficiencia.

Un ejemplo de restricciones a respetar son las relaciones de precedencia entre las tareas de ensamblaje. Ejemplos de objetivos productivos son la minimización del coste, tiempo de ciclo o número de puestos de trabajo de la línea de ensamblaje. El equilibrado de líneas de ensamblaje es un problema de optimización complejo, que se puede resolver mediante la utilización de técnicas propias de la investigación operativa, como son la resolución por algoritmos de optimización.

El problema del equilibrado de nuevas líneas de ensamblaje ha de ser resuelto a menudo por los ingenieros de procesos en empresas manufactureras. El autor de esta tesis ha afrontado durante más de 25 años como ingeniero de procesos este tipo de problemas en distintas empresas (Delphi, Doga y Germans Boada) y actualmente como consultor de operaciones. Durante la experiencia laboral acumulada, se ha podido constatar que, si bien es cierto que el problema del equilibrado de nuevas líneas de ensamblaje se puede resolver mediante algoritmos de optimización, existe un impedimento causado por la limitada transparencia algorítmica conseguida con las metodologías actualmente disponibles.

Se define la transparencia algorítmica como el principio por el cual los factores que influyen en las decisiones tomadas por un algoritmo de optimización deben ser visibles o

transparentes por las personas que los usan, los regulan y se ven afectadas por los sistemas que emplean esos algoritmos (Olhede et al. (2018)).

La motivación de esta tesis se encuentra en desarrollar una nueva metodología matricial previa a la aplicación de algoritmos de optimización, que mejore la transparencia algorítmica de los resultados posteriores obtenidos, facilitando la comprensión de cómo funciona el algoritmo de optimización aplicado, para ayudar en la toma de decisiones sobre modificaciones del diseño de la línea de ensamblaje al abordar cambios que no planificados inicialmente.

La metodología desarrollada, propone acercar la transferencia de conocimiento propia de la investigación operativa a la realidad de las pymes para planificar sus nuevas líneas de ensamblaje cuando han de montar su catálogo de productos con cada vez más referencias. El gran incremento en el número de referencias de producto a ensamblar es causado por la actual tendencia del mercado hacia la personalización de los productos motivada por los consumidores.

Actualmente, en muchas pymes el diseño de nuevas líneas de ensamblaje se aborda con un procedimiento muy manual, sin el uso de algoritmos de optimización de procesos. Los desarrollos de la tesis están alineados, de una manera muy inicial, con las mega tendencias de la utilización del Big data e inteligencia artificial (IA), que se incluyen en el paradigma de la Industria 4.0 para hacerlas llegar también a las pymes, fomentado el uso de algoritmos de optimización en el diseño de líneas de ensamblaje con muchas referencias de producto, que son difíciles de optimizar manualmente o sin una metodología pautada.

1.2.Objetivos

La presente tesis doctoral tiene como objetivo principal desarrollar una nueva metodología matricial con suficiente transparencia algorítmica efectiva para equilibrar líneas de ensamblaje en el momento de la industrialización de un nuevo catálogo de productos de una

misma familia. La transparencia algorítmica ligada a los algoritmos de optimización es un tema que no se trata de forma habitual en la literatura especializada y que se ha detectado como un impedimento a la hora de utilizar estos algoritmos en las pymes. El deseado nivel de transparencia algorítmica efectiva se define como aquella capaz de ofrecer suficiente información sobre los factores que influyen en el equilibrado resultante, permitiendo disponer de una guía para abordar la optimización posterior del sistema, exigida por futuras modificaciones.

Para lograr el objetivo principal, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Revisar el estado del arte referente al problema del equilibrado de líneas de ensamblaje y el uso de algoritmos de optimización.
2. Contrastar la implementación real de las metodologías mediante algoritmos de optimización descritas en la literatura especializada en problemas de equilibrado de líneas típicos de pymes e identificar posibles impedimentos para su uso en problemas reales.
3. Formular matemáticamente la nueva metodología matricial a usar conjuntamente con un algoritmo de optimización y establecer su nivel de transparencia algorítmica.
4. Establecer el marco de validez del tipo de problema de líneas de ensamblaje en el que se puede aplicar la nueva metodología matricial.
5. Aplicar la nueva metodología matricial a un ejemplo paradigmático para pymes y comparar los resultados con otras metodologías en cuanto a transparencia algorítmica y coste computacional de resolución.
6. Facilitar la difusión de técnicas de investigación operativa entre las pymes para la resolución del problema del equilibrado de líneas de ensamblaje tratado en esta tesis.

1.3. Estructura de la tesis

La tesis consta de 6 capítulos estructurados como sigue:

En el presente Capítulo 1 se introduce el problema abordado y se definen los objetivos de esta tesis.

En el Capítulo 2 se presenta el estado del arte. Se resumen los principales conceptos relacionados con el equilibrado de las líneas de ensamblaje, con una descripción general de los problemas que se han abordado en la literatura existente, incluyendo los procedimientos de solución propuestos. Se incluye el resultado de una entrevista realizada a 38 pymes a las que se ha consultado sobre el uso de algoritmos de optimización. Se concluye el capítulo con las principales conclusiones extraídas del análisis del estado del arte.

En el Capítulo 3 se presenta la nueva metodología matricial propuesta en esta tesis. Se describe el marco general de la metodología, así como los pasos a seguir para su implementación para abordar el problema del equilibrado de una línea de ensamblaje.

En el Capítulo 4 se aplica la nueva metodología matricial a un ejemplo paradigmático para las pymes encuestadas de la asociación CEAM-Metal y se compara con los métodos actuales descritos en el estado del arte.

Finalmente, en el **Capítulo 5** se presentan las principales conclusiones y propuestas de investigación futuras.

El Anexo 1 contiene la explicación de como se ha implementado el ejemplo mediante el programa informático Microsoft Excel.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen las principales características de las líneas de ensamblaje industriales, las principales tipologías y cómo se aborda el problema del equilibrado de las líneas de ensamblaje. Se presentan las principales metodologías de resolución existentes en la bibliografía especializada y se define el concepto de transparencia algorítmica. También se describe el marco organizativo industrial actual que rige a las pymes en referencia a las posibilidades para implementación de la metodología matricial propuesta en la tesis y se presenta una encuesta realizada a 38 pymes sobre cómo afrontan a día de hoy el problema del equilibrado de sus líneas de ensamblaje.

2.1.La línea de ensamblaje

Una línea de ensamblaje se puede definir como un proceso de fabricación secuencial en donde las partes de un producto son agregadas paulatinamente, mientras el producto final avanza entre estaciones de trabajo.

Las líneas de ensamblaje permiten que un producto pueda ser ensamblado más rápido y con menor trabajo global respecto a la estrategia de ensamblar un producto en posición fija. Es el método más común en las empresas de fabricación para ensamblar productos complejos como automóviles pero también bienes de consumo como electrodomésticos.

2.2.1. Diseño de una línea de ensamblaje para la industrialización de un catálogo de productos y su ciclo de vida

El diseño de una nueva línea de ensamblaje para la industrialización de un catálogo de productos es un proceso complejo. En su fase inicial se debe recopilar una completa información como la que se presenta en la Tabla 2.1 inspirada en Kamal et al. (2011).

Tabla 1. Información inicial a definir para el diseño de una nueva línea de ensamblaje.

Información de ejecución	Estaciones de trabajo
Variación del tiempo ciclo entre los diferentes productos.	Experiencia de los operadores. Motivación.
Tiempo ciclo.	Herramientas necesarias.
Número de estaciones de trabajo.	Necesidad de cambio de herramientas.
Problemas en los desplazamientos.	Tiempos de arranque.
Espacios disponibles.	<i>Buffers</i> .
Tipo de línea de transporte.	Tiempo medio de cada estación
Comunicación entre equipos.	Variación del tiempo entre diferentes modelos.
Complejidad de la tarea.	Ergonomía.
Confiabilidad.	Necesidad de almacenaje, absentismo...

El diseño de las líneas de ensamblaje ha sido estudiado en la bibliografía científica como en Zupan et al. (2015) y siempre se tiene en consideración los principios de la filosofía de *Lean Manufacturing*, que ayudan a la simplificación del problema, minimizando el número de fases de fabricación.

El objetivo para diseñar una línea de ensamblaje es obtener la mayor eficiencia en cuanto al uso de mano de obra, un óptimo equilibrado, producir sin problemas, un tiempo de entrega bajo, una rentabilidad lo más elevada posible, una mejor eficiencia de trabajo general y una producción *just in time* (Tasan et al.(2006)).

El ciclo de vida de una línea de ensamblaje se representa en la Figura 1. Se observa que, desde el diseño de una nueva línea de ensamblaje hasta quedar obsoleta, hay diferentes etapas que hacen evolucionar el proceso productivo: etapas de mejora continua, denominadas *Kaizen* y etapas de innovación o reingeniería, denominadas *Kaikaku*. Tanto la mejora continua del proceso (*Kaizen*) como su reingeniería e innovación (*Kaikaku*) son etapas complementarias que hacen mejorar el rendimiento de la línea de ensamblaje.

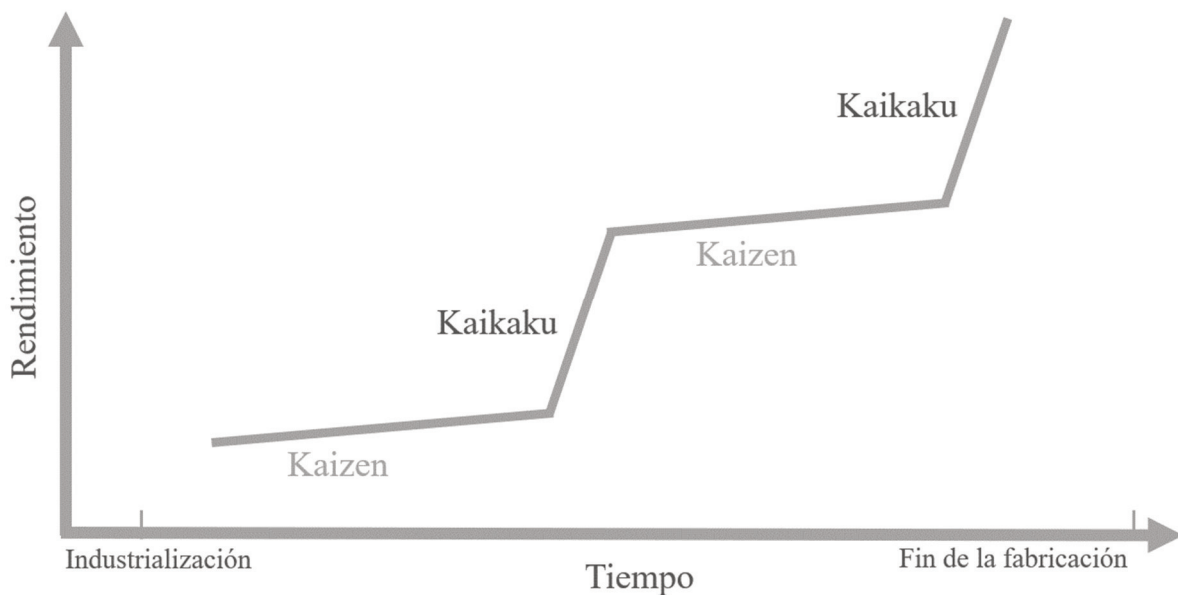


Fig. 1. Etapas de optimización durante el ciclo de vida de la línea de ensamblaje.

2.2.2. Tipos de líneas de ensamblaje

Las líneas de ensamblaje se clasifican de acuerdo a Dar et al.(1978) según:

Tipo de línea de transporte del producto

- Línea de transferencia síncrona o transferencia intermitente.

Todas las estaciones de trabajo tienen un tiempo de ciclo común, comienzan el procesamiento al mismo tiempo y las piezas avanzan simultáneamente entre estaciones de trabajo. Las líneas sincrónicas tienen una tasa de producción fija (Figura 2).

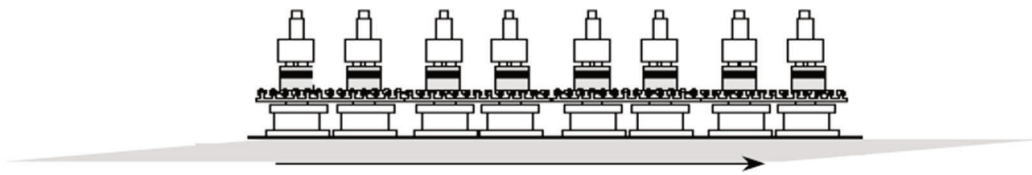


Fig. 2. Línea de transferencia síncrona

- Línea de transferencia asíncrona.

Las estaciones de trabajo pueden trabajar a velocidad variable. Las piezas se transfieren entre estaciones de trabajo cuando se han realizado las tareas requeridas. Las estaciones de trabajo están unidas por *stocks* amortiguadores (Figura 3).

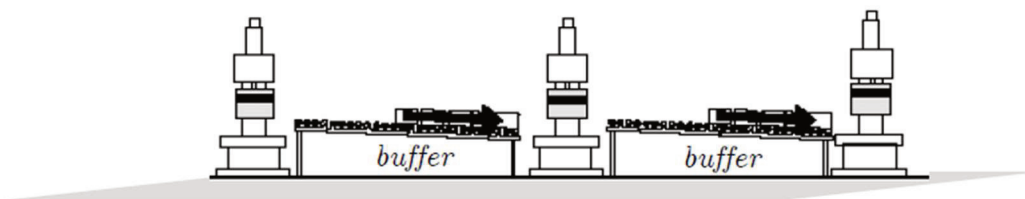


Fig. 3. Línea de transferencia asíncrona

- Línea de transferencia continua

Las estaciones de trabajo reciben un flujo de productos con un ritmo variable pero continuo y pueden tener *stocks* previos de acumulación para lograr una velocidad uniforme de trabajo (Figura 4).



Fig. 4. Línea de transferencia continua

Distribución espacial de las estaciones de trabajo

La distribución de las estaciones de trabajo o *layout*, se debe ajustar al espacio disponible en la planta de producción. De acuerdo a Becker et al. (2006), las principales distribuciones de las estaciones de trabajo son en línea recta, paralelas, de dos lados y en forma de U.

- Líneas de ensamblaje rectas.

Se disponen las estaciones de trabajo colocadas en serie, en donde los productos pasan consecutivamente de una estación a la siguiente, por ejemplo, a través de una cinta transportadora (Figura 5a).

- Líneas de ensamblaje paralelas.

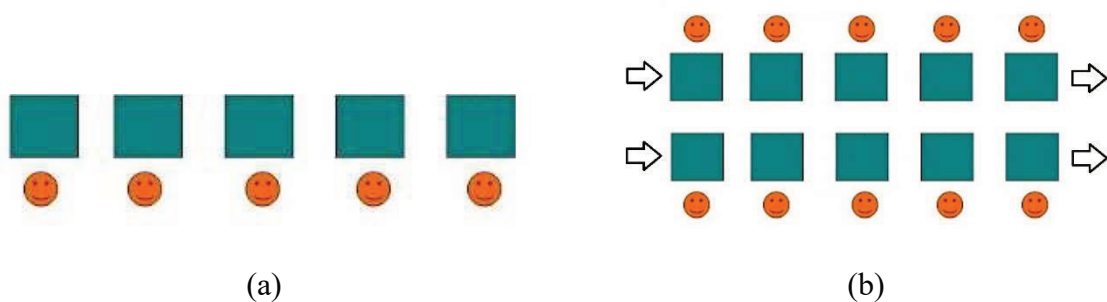
Son varias líneas rectas colocadas en paralelo. Esta distribución es útil para el caso de ensamblar múltiples modelos o referencias de un catálogo de productos, en el que se asigna una línea recta para cada referencia (Figura 5b).

- Líneas de ensamblaje de dos lados.

En lugar de una estación de trabajo donde solo se puede trabajar por un lado de la línea de transporte, se puede trabajar por ambos lados que procesan simultáneamente un mismo producto (Figura 5c). muy habituales En el sector de la automoción.

- Líneas de ensamblaje en U.

Los operarios pueden trabajar en los tres segmentos de la línea de transporte, donde están ubicadas las estaciones de trabajo, de manera que la distancia entre estaciones de trabajo es mínima (Figura 5d). Esta distribución presenta la ventaja de permitir un mejor balance en la carga de las estaciones porque es más flexible para distribuir entre los operarios las tareas de ensamblaje. Su implementación es consecuencia habitual de la introducción del principio de producción *just in time*.



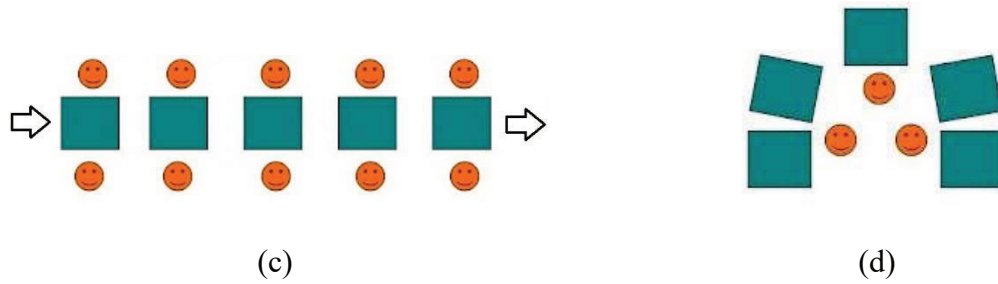


Fig. 5. Líneas de ensamblaje según la distribución espacial de las estaciones de trabajo

La decisión final sobre la distribución depende del enfoque de la producción, objetivos y restricciones. Algunas de las restricciones de diseño relacionadas con el equilibrado de la línea de ensamblaje son restricciones de precedencia, restricciones de zonificación y restricciones de capacidad (Vilarinho et al. (2006)).

Número de productos a ensamblar

- Línea para una única referencia de producto o SAL (acrónimo de *Single Assembly Line*).

Se ensambla una única referencia de producto. Si bien esta referencia de producto puede tener variaciones (Figura 6), son pequeñas y no implican cambios significativos en las herramientas de producción utilizadas.



Fig. 6. Línea de ensamblaje de un único modelo SAL

- Línea con mezcla de productos o MMAL (acrónimo de *Mixed-Model Assembly Lines*).

Se ensamblan diversas variantes de un producto base, denominadas referencias del producto, que son producidas de manera mezclada y secuencial. Se considera que ensamblar una referencia de producto u otra no implica tiempos de cambio de referencia de producto importantes, ya que las tareas de ensamblaje son muy parecidas entre las referencias de producto (Figura 7).



Fig. 7. Línea de ensamblaje con mezcla de modelos. MMAL

- Líneas multi producto o MuMAL (acrónimo de *Multi-Model Assembly Lines*).

Diversos productos con diferencias significativas son producidos en la misma línea de ensamblaje. Los distintos productos se producen por lotes (Figura 8). Suelen ser necesarios tiempos de cambio o *setups* al finalizar cada lote para poder empezar a fabricar el siguiente.

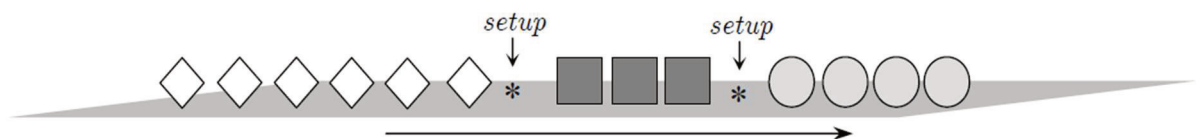


Fig. 8. Línea de ensamblaje con múltiples modelos. MuMAL

Además de los criterios de clasificación indicados por Dar et al.(1978), existen otros criterios complementarios:

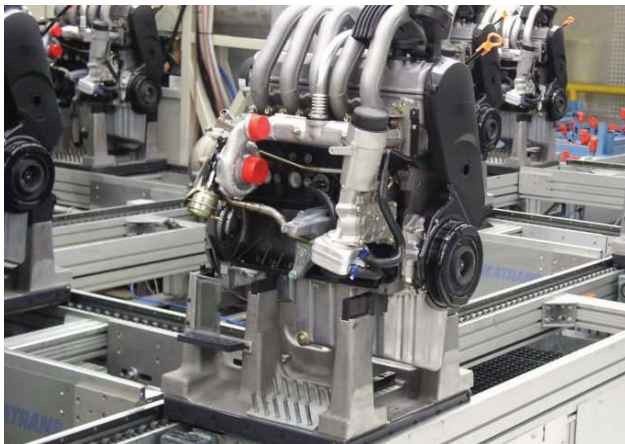
Tipo de sistema de transporte.

- Transportador de velocidad constante: se mantiene siempre en movimiento a velocidad constante.
- Transportador estacionario: el producto permanece fijo en cada estación de trabajo y se transfiere a la siguiente estación de trabajo después de completar las tareas de ensamblaje correspondientes.

Relación del producto respecto al sistema de transporte.

- Productos fijos: los productos no pueden moverse independientemente del movimiento del sistema de transporte. Habitual para productos grandes y pesados, como lavadoras, neveras o motores como el de la Figura 9a.
- Productos móviles: pueden ser retirados del sistema de transporte, trabajados y posteriormente devueltos (Figura 9b). Permite la acumulación de *stocks* intermedios.

a)



b)



Fig. 9. Sistemas de transporte fijo (a) y móvil (b)

Tipología de las estaciones de trabajo.

- Estaciones de trabajo cerradas. Existen límites físicos o barreras entre estaciones de trabajo adyacentes, como un foso, una cabina o una cámara de calefacción. No está previsto que los operarios puedan cambiar de estación.
- Estaciones abiertas: Se pueden cruzar los límites entre estaciones de trabajo. Esta tipología es habitual en células flexibles de fabricación, habitualmente en forma de U.

Disciplina de lanzamiento.

De acuerdo a Kilbridge et al.(1962) y Wester et al.(1961) las disciplinas de lanzamiento son:

- Lanzamiento con tasa fija de producción: el período de lanzamiento es el promedio ponderado del tiempo total de ensamblaje para todos los productos que se deben ensamblar en la línea de ensamblaje.
- Lanzamiento con tasa variable: el período de lanzamiento es el tiempo en completar las tareas de ensamblaje correspondientes a la unidad en curso, una vez completadas, el operador puede comenzar a trabajar inmediatamente en la siguiente unidad (Fattahi et al.(2020)).

La disciplina de lanzamiento es irrelevante para líneas de ensamblaje con búfers intermedios de almacenamiento.

2.2. El Problema del equilibrado de líneas de ensamblaje

El problema del equilibrado de líneas de ensamblaje o ALB (acrónimo de *Assembly Line Balancing*) consiste en asignar las tareas que son necesarias para el ensamblaje de un producto o catálogo de productos a las diferentes estaciones de trabajo de la línea, cumpliendo con criterios de eficiencia productiva y respetando una serie de restricciones.

La clasificación según Kamal et al.(2011) de los problemas de equilibrado de una línea de ensamblaje se presenta en la Figura 10.

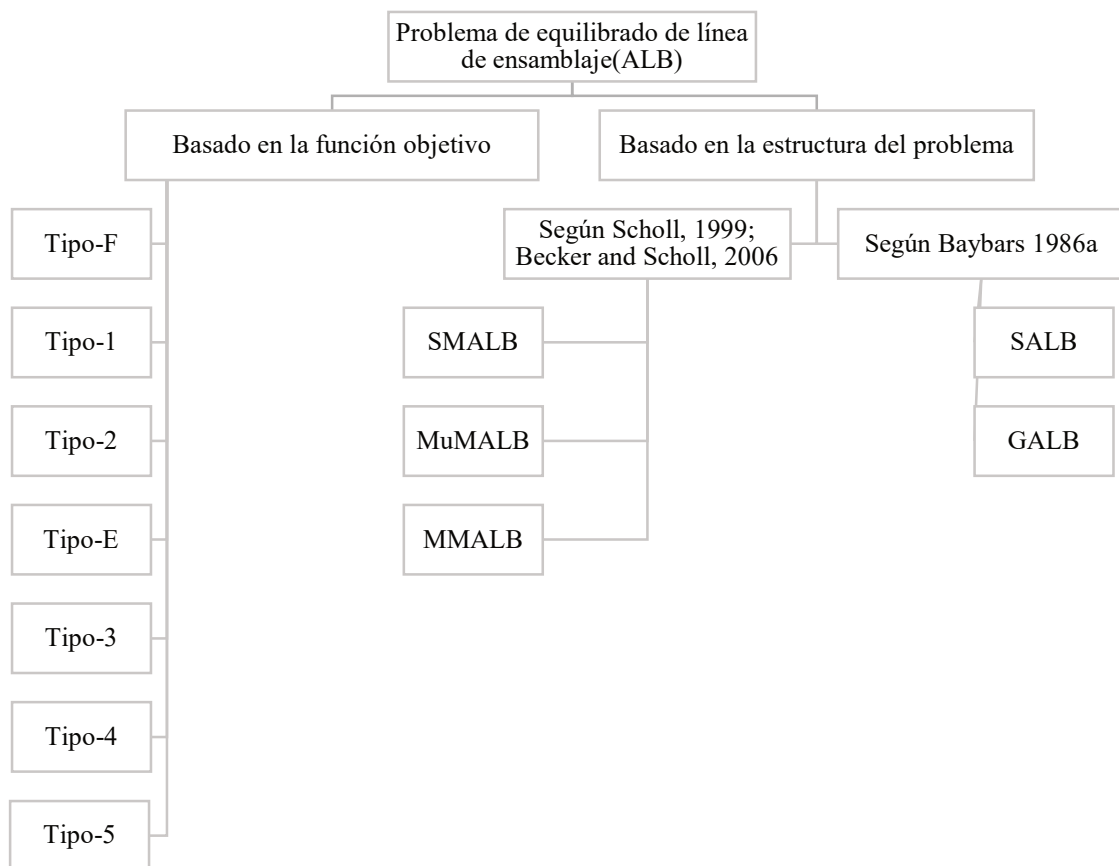


Fig. 10. Clasificación de ALBs por Kamal et al. (2011)

Según la función objetivo los problemas ALB se clasifican como: i) de tipo-F o de factibilidad, obteniendo una solución factible para un número dado de estaciones de trabajo y

un tiempo de ciclo dado; ii) de tipo 1, obteniendo una minimización del número de estaciones de trabajo para un tiempo de ciclo determinado (Mamun et al.(2012)); iii) de tipo 2, obteniendo una minimización del tiempo de ciclo para un número determinado de estaciones de trabajo (Kilincci et al.(2010)); iv) de tipo-E, obteniendo una minimización del número de estaciones de trabajo y del tiempo de ciclo (Su et al.(2014)); v) de tipo 3, obteniendo una maximización de la suavidad de la carga de trabajo, vi) de tipo 4, obteniendo una maximización de la relación laboral, vii) de tipo 5, obteniendo una maximización de la suavidad de la carga de trabajo y de la propia carga de trabajo.

Considerando la estructura del problema, según Becker et al.(2006), los problemas ALB se clasifican en: i) SMALB, para problemas ALB de un solo producto; ii) MuMALB, para problemas ALB de productos múltiples, donde se ensamblan múltiples productos en lotes en una misma línea de ensamblaje; iii) MMALB, para problemas ALB de productos mixtos, donde se producen varios modelos de una misma familia o de un catálogo de productos genérico en la misma línea de ensamblaje.

Baybars (1986) propone otra clasificación alternativa, de acuerdo a la estructura del problema: i) SALB (acrónimo de Simple Assembly Line Balancing), la versión más simple de los problemas de equilibrio; ii) GALB (acrónimo de General Assembly Line Balancing), que incluye los problemas que no están incluidos en la categoría de SALB.

2.3. Metodologías de resolución del problema de equilibrado de líneas de ensamblaje

Dentro de la investigación de operaciones existen diferentes metodologías para el equilibrado de líneas de ensamblaje, con sus propias ventajas e inconvenientes. Diversos autores han estudiado y comparado las potencialidades y el coste computacional de cálculo.

Sivasankaran et al. (2016), en su revisión del estado del estado del arte de la bibliografía relacionada de los problema ALB de modelos mixtos (MMALB), presenta las siguientes metodologías de resolución:

- Modelos matemáticos.
- Método de ramificación y poda.
- Heurísticas.
- Algoritmos genéticos.
- Algoritmo ACO.
- Algoritmo colonia de abejas múltiples.

En la Figura 11 se presentan otra clasificación más detallada de estas mismas metodologías propuesta por Kamal et al.(2011).

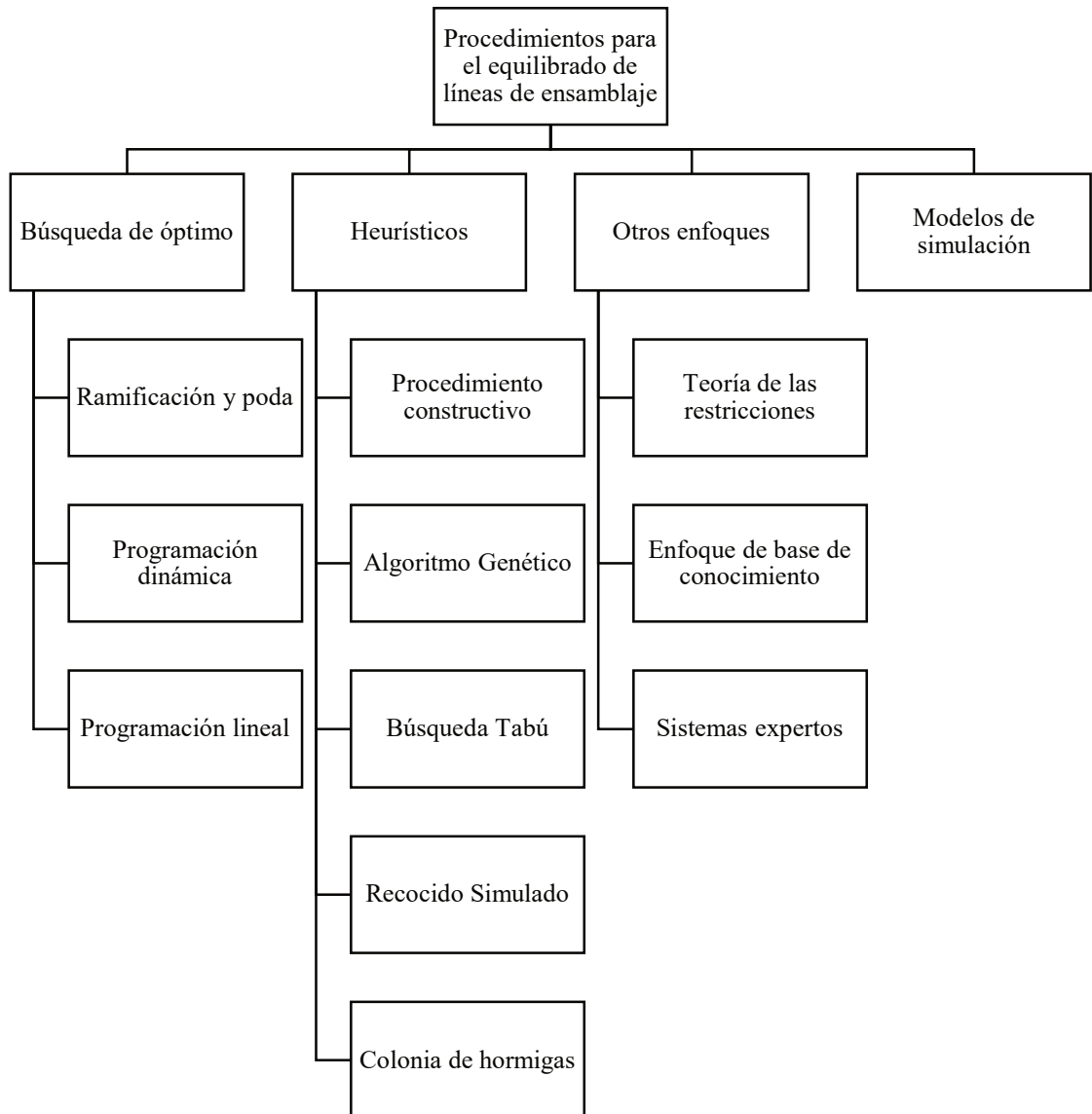


Fig. 11. Metodologías de equilibrado de procesos Kamal et al. (2011)

Las líneas de ensamblaje clasificadas como MMALB, en disposición de línea recta y con un número fijo de estaciones de trabajo, son frecuentes en el entorno de pymes de diferentes sectores, como el del metal u otros dedicados habitualmente al ensamblaje. En estos casos, que son los de interés para la tesis, se encuentran estudios principalmente de dos tipos de algoritmos de optimización: recocido simulado y algoritmos genéticos (AG). Los AG se escogen con frecuencia para resolver estos problemas de optimización.

En los problemas MMALB, la atomización de lotes provocada por las estrategias *just-in-time* y la creciente extensión del catálogo de productos hace que, al diseñar nuevas líneas de ensamblaje, se definan en base a los principios del *one-piece-flow* de la filosofía del *Lean Manufacturing*, con el objetivo de intentar aliviar los costes adicionales que implica la gestión de pequeños lotes de producción, siendo muy relevante obtener un equilibrado de la línea de ensamblaje óptimo para todas las referencias del producto.

Para la resolución de los problemas MMALB tipo 2 existen una amplia gama de métodos: heurísticos (Yan et al.(2014)), algoritmo genético (Sabuncouglu et al.(2000)), búsqueda tabú (Chiang et al.(1998) y Esmailian et al.(2011)), optimización de colonias de hormigas ACO (Yagmahan et al.(2011)), recocido simulado (Roshani et al.(2015)), además de otras metodologías habituales para sistemas pequeños como modelos matemáticos (Baybars et al.(1986)) o de Ramificación y Poda.

Pinarbasi et al.(2019) desarrolla una solución eficiente con modelos matemáticos usando programación de múltiples restricciones para líneas de ensamblaje ALB tipo-2. Michels et al. (2020) desarrolla un modelo de programación de enteros lineales para resolver óptimamente ejemplos reales de gran tamaño en líneas de ensamblaje de varios lados.

Nazari et al.(2020) en un problema tipo MMALB, considera las dependencias entre operaciones de los tiempos de cambio de referencia, encontrando que los algoritmos de recocido simulado son más eficientes que los modelos de programación de enteros mixtos.

Abdeljaouad et al. (2021) generaliza la solución de los algoritmos de búsqueda tabú para líneas de ensamblaje MALBP, comenzando desde la minimización del tiempo de ciclo usada en líneas de un único modelo SALBP.

Kucukkoc et al. (2016) desarrolla la resolución con algoritmos ACO para problemas de líneas de ensamblaje MMALB de dos lados paralelos. Los valores obtenidos, en cuanto a equilibrado entre estaciones de trabajo, no son tan buenos como otras soluciones, aunque

presentan la ventaja de una mayor flexibilidad de la línea de ensamblaje a los cambios en la demanda. Con su método, cualquier nuevo producto, inicialmente no contemplado, puede ser implementado en la línea de ensamblaje diseñada, sin necesidad de modificar el equilibrado.

El AG es el enfoque más extendido en comparación a los mencionados previamente para problemas MMALB. Barathwaj et al. (2015) estudia un AG multiobjetivo con variables ergonómicas que aumenta la tasa de producción a la vez que reduce la fatiga de los operarios. Ramezani et al. (2015), utiliza un algoritmo imperialista evolutivo para optimizar una función multiobjetivo, donde se optimizan los tiempos de ciclo considerando las habilidades de los operadores. Zhao et al. (2016) desarrolla un procedimiento multiobjetivo que combina tiempos de ciclo y cargas mentales. Rabbani et al. (2016) estudia el equilibrio de células robóticas con optimización multiobjetivo teniendo en cuenta el tiempo de ciclo, el tiempo de configuración y el coste del equipo. Liu et al. (2021) desarrolla un nuevo modelo de optimización bajo demanda incierta, resuelto por un AG mejorado. Zamzam et al. (2021) estudia el problema de equilibrar líneas de ensamblaje con múltiples operarios, considerando restricciones de tiempo y de espacio físico para la distribución, utilizando un AG. Para problemas MMALB tipo 2, Simaria et al. (2004) desarrolla un modelo AG para optimizar las líneas de ensamblaje y Su et al. (2007) desarrolla una solución que es válida para sistemas pequeños, aunque sin considerar las relaciones de precedencia entre las tareas de ensamblaje, pudiendo dar lugar a soluciones no válidas. De todos estos estudios centrados en la aplicación de un AG en problemas tipo MMALB, ninguno se centra en la mejora de la transparencia algorítmica.

Teniendo en cuenta el enfoque de solución de los algoritmos de ramificación y poda para problemas tipo MMALB, Li et al. (2014) and Yang et al. (2014) consideran nuevas heurísticas utilizando el trabajo de horas extra en un entorno de demanda variable. Hazır et al.

(2021) incorpora nuevas fórmulas para calcular dinámicamente un límite inferior en el valor óptimo de la función objetivo y para determinar las estaciones de trabajo óptimas para las tareas.

Considerando la metodología de algoritmos de colonias de abejas para problemas tipo MMALB, Akpınar et al. (2014) desarrolla un novedoso algoritmo de abejas híbridas de colonias múltiples para mejorar las capacidades de búsqueda del algoritmo básico con tiempos de preparación dependientes de la secuencia entre tareas de ensamblaje. Çil et al. (2020) combina modelos matemáticos y algoritmos de abejas, considerando la colaboración física de humanos y robots. Este estudio se centra en la mejora del rendimiento algorítmico para la reducción del coste computacional.

La literatura específica analizada para abordar problemas ALB, en particular problemas MMALB tipo 2 de interés para esta tesis, trata esencialmente sobre la optimización matemática o la adición de funcionalidades a los algoritmos, como múltiples objetivos de optimización, gestión de la incertidumbre o variabilidad

Adicionalmente, se observa que la mayoría de los autores basan sus estudios en programas informáticos que no son de uso habitual entre las pymes.

Eghtesadifard et al. (2020), en una reciente revisión sistemática de los artículos científicos relacionados con los problemas ALB entre 1990 y 2017, destaca que no se han realizado suficientes estudios de investigación sobre el desempeño en escenarios industriales reales, cuestionando el uso que se hace en la industria de estos algoritmos de optimización para problemas ALB. Los citados autores sugieren el análisis en entornos industriales reales de los estudios realizados en el pasado, concretamente en términos de eficiencia de la línea de ensamblaje, tiempo de inactividad o mejora de flexibilidad.

2.4. La transparencia algorítmica en los algoritmos de optimización

No se han encontrado estudios que se centren en lograr una transparencia algorítmica para facilitar el uso de los algoritmos de optimización y su explotación en entornos industriales reales. La mayoría de los trabajos de la literatura científica, tratan de modificar los algoritmos de optimización para particularizarlos a distintos casos, ya sea aumentando el número de restricciones o las variables a optimizar. Todos estos estudios, en general, aumentan la complejidad y los hacen menos atractivos de ser empleados por las Pymes.

La transparencia algorítmica se define como la facilidad de entender o interpretar la influencia de los factores que regulan el funcionamiento de resolución de los algoritmos de optimización, una vez se ha planteado un modelo matemático para el problema del equilibrado de una línea de ensamblaje.

Cuando se aplican algoritmos de optimización, la interpretabilidad del modelo planteado, las decisiones realizadas por el algoritmo y los resultados obtenidos se vuelven gradualmente más complejos (Olhede et al. (2018)). Cuanto más complejo es un algoritmo de optimización, mayor dificultad surge en la comprensión clara de sus mecanismos de resolución. Incluso si la función a optimizar es sencilla, cuando se aplica un algoritmo de optimización, es difícil llegar a comprender cómo se ha conseguido una solución optimizada y el efecto que se produciría en dicha solución si se modifica algún parámetro de entrada, como pasa en los procesos industriales reales, donde frecuentemente surgen imprevistos.

Relacionado con esta falta de transparencia, algunos autores tratan este concepto en algoritmos actuales de *Deep Learning*. Montavon et al. (2017), definiendo un nuevo método denominado *deep taylor decomposition*, utiliza la estructura de la red neuronal para interpretar las decisiones tomadas por el sistema, respecto a la contribución de los valores de entrada. Boz

et al. (2002), por su parte, estudia la generación de árboles de decisiones desde modelos ya entrenados de redes neuronales, mediante la aplicación de un AG.

El único estudio identificado que se centra en la clarificación de los resultados es el de Wei et al. (2011), que estudia la programación lineal de este tipo de problemas mediante *Microsoft Excel VBA*, proponiendo una mejor comprensión de la gestión posterior gracias a presentar los resultados a través de una hoja de cálculo. Sin embargo, solamente se mejora la presentación de los resultados, sin ofrecer un modelo matemático exhaustivo que muestre los factores de influencia sobre la solución y que permita una mejor comprensión. El caso estudiado es un problema tipo SALB, por lo que no es aplicable a problemas MMALB más complejos.

2.5.El marco Organizativo industrial en las pymes.

En este apartado se expone la situación actual de las pymes al afrontar el problema de equilibrado de sus líneas de ensamblaje. Se describen las estrategias industriales más usuales que habrán de ser tenidas en cuenta al implementar la nueva metodología matricial y el estado de aplicación actual en las pymes.

2.5.1. Lean Manufacturing

Lean Manufacturing es un proceso continuo y sistemático de identificación y eliminación de actividades que no agregan valor en un proceso, identificadas como desperdicios. Estos desperdicios implican un coste y un esfuerzo innecesario para cualquier organización. El *Lean Manufacturing* se basa en la premisa de que todo puede hacerse mejor,

de manera que una organización debe buscar siempre la mejora continua en sus procesos y productos.

Una organización que aplica *Lean Manufacturing* debe ajustar su producción a la demanda, en el momento y cantidades en que sea solicitada y con el mínimo costo (Lam et al. (2016)). El *Lean Manufacturing* se define como una filosofía de producción que agrupa un conjunto de técnicas que facilitan el diseño y gestión de un sistema productivo, capaz de suministrar en función de la demanda, con el mínimo costo, una calidad competitiva y alta flexibilidad. Esto se traduce en oportunidades de minimizar inventarios, retrasos, espacio, costos, energía y mejorar la calidad. Existen múltiples estudios como el de Santos et al. (2015) donde se expone como los principios del *Lean Manufacturing* consiguen incrementar la productividad mediante mejoras ergonómicas, el aumento de la seguridad de los operarios y la repercusión en la calidad del producto.

Conceptos actuales englobados dentro del marco de la Revolución Industrial 4.0, como serían los sistemas ciber físicos o el *big data*, se apoyan en pautas organizativas presentes en las últimas décadas de la aplicación del *Lean Manufacturing* por parte de las organizaciones (Gonçalves et al. (2017)).

Uno de los aspectos más importantes para afrontar correctamente el equilibrado de las líneas de ensamblaje, es la estandarización de las tareas de ensamblaje y la medición de tiempos promovidos desde la filosofía del *Lean Manufacturing*.

Sobre este último aspecto, las pymes se encuentran en situaciones muy diversas, pese a que la estandarización y medición deberían ser prácticas generalizadas, todavía hay un número importante de pymes que no han llevado a cabo estos pasos previos para poder equilibrar sus líneas de ensamblaje.

2.5.2. Ingeniería concurrente

La ingeniería concurrente es un esfuerzo sistemático para diseñar de forma integral los productos, considerando aspectos de las posteriores etapas necesarias de fabricación y de servicio. Pretende que los departamentos encargados del diseño del producto tengan en cuenta, desde un principio, todos los elementos del Ciclo de Vida del Producto, desde el diseño conceptual hasta su disponibilidad, incluyendo calidad, costo y necesidad de los usuarios.

El término ingeniería concurrente surge en 1988, en el reporte R-338 del Instituto de Análisis de la Defensa de los EE.UU. (IDA). Autores como Cochran et al. (2016) proponen y analizan sistemáticas para dicha ingeniería concurrente.

Una ventaja de la realización de los diseños e industrializaciones de los productos mediante ingeniería concurrente es la reducción del tiempo total de desarrollo, gracias al aprovechamiento del conocimiento y experiencia de todos los participantes, lo que mejora el propio diseño y facilita su industrialización.

La ingeniería concurrente es de uso bastante común entre las grandes empresas industriales, sin embargo, no está tan extendida en las pymes. Aun pareciendo un contrasentido, es habitual una peor comunicación interdepartamental en dichas pymes pese a que, por su tamaño, puede parecer más fácil dicha comunicación. Por este motivo, es aconsejable definir los procedimientos necesarios para garantizar la aplicación de la ingeniería concurrente durante el diseño e industrialización en las pymes.

La ingeniería concurrente es una parte de la estrategia para el diseño e industrialización indispensable para la implementación de la nueva metodología matricial de equilibrado de líneas de ensamblaje presentada en esta tesis.

2.5.3. Diseño de producto modular-funcional

El diseño modular es un enfoque de diseño que subdivide un producto en partes más pequeñas llamadas módulos, que pueden crearse de manera independiente y luego usarse en diferentes productos. Es habitual que algunos de estos módulos conformen, cada uno de ellos, una funcionalidad determinada para el producto.

Pil et al. (2004) explican que el diseño modular-funcional, junto con la ingeniería concurrente, proporciona a las empresas información valiosa para gestionar una amplia variedad de productos. Además, exponen que no existe un vínculo directo entre el nivel de variedad de producto que una empresa ofrece a sus clientes y la complejidad en la fabricación. El éxito de cualquier estrategia dirigida a rebajar los costos y evitar las posibles complicaciones de producir una gran variedad de productos, depende en parte de una correcta definición de la gestión de operaciones. Disponer de un catálogo de productos extenso, tendencia muy actual debido a la personalización del producto, facilita las ventas pero a su vez, puede aumentar la complejidad para diseñar la línea de ensamblaje. Es recomendable que la empresa se sume a esta tendencia de una alta personalización ya que, de no hacerlo, puede disminuir las posibles ventas, lo que a medio plazo va en detrimento de la producción. Pil et al. (2004) analizan la correlación entre la diversidad de variaciones del producto y la complejidad resultante del proceso de ensamblaje. En su estudio analizan diversas metodologías para la simplificación mediante el diseño modular-funcional, la personalización final, los conjuntos de opciones y la variabilidad.

Tampoco es conveniente el hecho de disponer de un catálogo demasiado duradero, ya que cuantas más generaciones de un catálogo de productos ofrezca una empresa a lo largo del tiempo, mayor es la variedad que ofrece a sus clientes, contribuyendo a incrementar las ventas.

Consecuentemente, es adecuado disponer de una estrategia de diseño y gestión de las líneas de ensamblaje que sea capaz de producir un catálogo de productos variable en el tiempo

y con múltiples referencias, permitiendo una sencilla y rápida implementación de las modificaciones necesarias. En muchos sectores, la vida promedio desde la introducción de un producto hasta el reemplazo o a una renovación importante ha ido disminuyendo constantemente en los últimos años.

La industria a menudo relaciona modularidad con subcontratación. La subcontratación conlleva riesgos asociados, como la pérdida de exclusividad del producto debido a la estandarización en el mercado de dichos módulos funcionales. No obstante, startups y fabricantes líderes como Tesla han optado por limitar la subcontratación (Movsesyan et al. (2020)). Esta tendencia a la integración vertical de la fabricación no es incompatible con un diseño de producto modular-funcional; al contrario, permite obtener su máximo potencial en cuanto a eficiencia de la producción.

En los casos en los que el número de referencias de producto es muy elevado, el diseño modular-funcional facilita la resolución matemática mediante algoritmos de optimización.

La situación de las pymes en cuanto a la implementación de los principios del *Lean Manufacturing*, ingeniería concurrente y diseño modular-funcional es muy diversa. Pero el hecho de tener que fabricar cada vez un catálogo de productos más extenso (debido a la personalización) y menos duradero es una realidad industrial para la gran mayoría. Todo esto se suma a que los desarrollos en el ámbito de la automatización de la producción, frecuentemente se realizan para sustituir tareas realizadas por operarios por robots. Es por esto por lo que cobra más importancia optimizar al máximo el rendimiento de la línea de ensamblaje para garantizar una amortización más rápida de dichas inversiones.

La filosofía *Lean Manufacturing* propone estrategias que mitigan los efectos negativos de tener que gestionar la producción de un catálogo de productos extenso, sin embargo, no atacan la raíz del problema. La implementación de un diseño del catálogo de productos modular-funcional, combinado con los principios de la ingeniería concurrente logran

simplificar la gestión de la fabricación de un catálogo de productos sin exigir reducir la variedad.

El grado de implementación en las pymes de los principios del *Lean Manufacturing*, ingeniería concurrente y diseño modular-funcional es muy diversa, siendo un paso previo adecuado para hacer frente a la producción de un catálogo de productos cada vez más extenso y menos duradero. Además, la aplicación de estas filosofías de trabajo es requisito necesario para poder aplicar la nueva metodología matricial del capítulo 3.

2.6. Encuesta a pymes sobre el equilibrado de sus líneas de ensamblaje

En el trabajo de Eghtesadifard et al. (2020) se presenta una revisión de la investigación publicada en la *web of science* de 1990 hasta el 2017 sobre el problema de equilibrado de líneas de ensamblaje. En este trabajo se concluye que existe una desconexión entre la extensa investigación realizada y la implantación real de los algoritmos de optimización en las empresas. Es por lo que se pide más estudios de casos reales.

En este apartado, se presenta una encuesta realizada a pymes del sector metal asociadas a CEAM-Metal –Centro de Estudios y Asesoramiento Metalúrgico–, para contribuir al análisis sobre como las pymes abordan el problema del equilibrado de líneas y su grado de conocimiento de los métodos que se plantean en el campo de la investigación operativa, como son los algoritmos de optimización como los AG. Para ello el autor de esta tesis, también ha incluido a los contactos como consultor y formador del CEAM-Metal,

La encuesta se envió a 74 ingenieros de procesos de pymes, obteniendo 38 respuestas, mediante un formulario online. Las pymes que contestaron corresponden principalmente al sector metal, en su mayoría con hasta 250 trabajadores y su catálogo de productos a fabricar abarca desde los componentes de automoción tier 3 o 4, hasta elementos auxiliares como

herramientas y bienes de consumo. Estas empresas, disponen al menos de una línea de ensamblaje con mezcla de referencias de producto en disposición de línea recta, que encajan en la categoría de problema MMALB tipo 2.

La encuesta se ha organizado con una pregunta principal dirigida a los ingenieros de procesos sobre si equilibraban sus líneas de ensamblaje:

”¿Su empresa realiza el Equilibrado de tiempos entre puestos de trabajo en alguno de sus procesos productivos?”.

Si la respuesta a esta pregunta es afirmativa, entonces aparece una segunda cuestión:

“¿Utiliza su empresa sistemas o algoritmos con inteligencia artificial para realizar dichos equilibrados?”.

Finalmente, a las empresas que respondieron afirmativamente, se les requirió información sobre el sistema o algoritmo usado y la valoración de su desempeño.

La Figura 12 presenta los resultados de la encuesta.



Fig. 12. Resultados encuesta.

Los resultados obtenidos muestran que el uso de AG es muy bajo o nulo en las pymes. Solamente 1 de ellas contestó afirmativamente a la utilización de algoritmos y, preguntada a posteriori, no utilizaba un AG sino un asistente de equilibrado integrado en el software de gestión de la planta industrial.

De las 14 pymes que realizaban algún proceso de equilibrado de sus líneas de ensamblaje, a la posterior pregunta de los motivos por los que no utilizaban algoritmos de optimización como los AG, las respuestas más habituales fueron:

- Dificultad para entender la estrategia de resolución desarrollada por un AG, es decir, falta de transparencia algorítmica. Esto dificulta el uso del modelo matemático generado para realizar una eficiente toma de decisiones en cuanto a la mejora de las líneas de ensamblaje diseñadas con los resultados proporcionados por un AG.
- La falta de disponibilidad en las pymes de hardware informático potente, experiencia en la implementación del AG y software científico especializado, más allá de las hojas de cálculo.

Los resultados de la encuesta están alineados con lo que expone Eghtesadifard et al. (2020), en cuanto a la desconexión entre la investigación realizada y la implementación en casos industriales reales, particularizado en el caso de pymes asociadas a CEAM-Metal con líneas de ensamblaje tipo MMALB tipo 2.

2.7. Conclusiones de la revisión del estado del arte

De la revisión del estado del arte de la literatura científica especializada sobre el problema del equilibrado de líneas de ensamblaje, de su contraste con la encuesta realizada a pymes asociadas a CEAM-Metal, así como de la experiencia del autor de esta tesis de 25 años como ingeniero de procesos, se extraen las siguientes conclusiones:

- La mayoría de los trabajos científicos en el ámbito de la investigación operativa publicados se centran en aumentar la complejidad de los modelos matemáticos (ya sea con más restricciones u optimización de múltiples variables) o mejorar

el coste computacional en cuanto a tiempo de cálculos. Todo ello aumenta la complejidad de los modelos y aleja su posible implementación en pymes.

- De la encuesta realizada y en línea con las conclusiones de Eghtesadifard et al. (2020), se necesitan más estudios de casos reales sobre la implementación de estas metodologías de optimización. O al menos ayudar a facilitar que industrias reales se atrevan a adoptar las metodologías descritas en la literatura específica.
- Las metodologías explicadas son de difícil implementación por parte de la mayoría de las pymes, ya que exigen un mínimo de organización de la producción e información de la empresa. Al menos se tiene que disponer de los preceptos básicos de buenas prácticas explicados por las filosofías *Lean Manufacturing*, ingeniería concurrente y diseño modular-funcional.
- Existen pocos trabajos enfocados a la mejora de la transparencia algorítmica, identificada por el autor de esta tesis como uno de los impedimentos para facilitar la implementación del uso de algoritmos de optimización para pymes.
- Aumentar la complejidad de estos algoritmos, puede alejar aún más el uso de estas técnicas por parte de las pymes. Enfoques más sencillos, pero más aplicados, pueden ayudar al uso de los algoritmos de optimización por parte de las pymes que actualmente en el sector Metal es muy residual.

CAPÍTULO 3. NUEVA METODOLOGÍA MATRICIAL PARA MEJORAR LA TRANSPARENCIA ALGORÍTMICA

En este capítulo se desarrolla la nueva metodología matricial a aplicar conjuntamente con un algoritmo de optimización, como son los AG, en el problema del equilibrado de las líneas de ensamblaje (ALBP). La implementación de esta nueva metodología matricial permite mejorar la transparencia algorítmica obtenida, hasta unos niveles suficientes para que las pymes puedan tomar decisiones durante las modificaciones de sus líneas de ensamblaje, derivadas por ejemplo de cambios imprevistos. La metodología propuesta se ha implementar en programas informáticos de amplia difusión en las pymes como hojas de cálculo. En el apartado 3.1. se define el problema de estudio, así como su modelización matemática y se plantea la resolución de este problema sin utilizar la metodología matricial propuesta, mediante el uso de un AG, tal y como se haría con los métodos encontrados en la bibliografía especializada. En el apartado 3.2, se definen en detalle las etapas de la nueva metodología matricial a implementar y cómo se resolvería el mismo problema, resaltando las mejoras en cuanto a la transparencia algorítmica obtenidas con la nueva metodología matricial.

3.1. Definición del problema de estudio

La tesis aporta soluciones al problema industrial del equilibrado de líneas de ensamblaje, que consiste en lograr un equilibrio entre los tiempos de operación asignados a cada estación de trabajo y cumplir con la cadencia de fabricación requerida para fabricar el catálogo de productos completo en dicha línea de ensamblaje.

La hipótesis inicial es que todas las referencias de productos en una línea de ensamblaje de productos tipo modelo mixto (MMALB) pueden equilibrarse simultáneamente minimizando

la desviación estándar de los tiempos de operación agregados que se asignan a cada una de las estaciones de trabajo para cada grupo de funcionalidades del producto.

El alcance general para el que se ha desarrollado la nueva metodología matricial es el del problema de equilibrado, en donde las líneas de ensamblaje son lineales, de lado único, con transferencia síncrona o asíncrona y en las que se fabrican modelos mixtos. La tipología, en cuanto a la estrategia de equilibrado, es la de minimizar el tiempo ciclo para un número determinado prefijado de estaciones de trabajo.

De acuerdo con el apartado 2.2, significa que el tipo de problema analizado se clasifica como MMALB tipo 2. La línea es de modelo mixto (MM) porque se ensamblan múltiples referencias de producto de una misma familia de productos. Los problemas tipo 2 son aquellos en que la función objetivo a minimizar es el tiempo de ciclo para un determinado número de estaciones de trabajo (Kilinci et al. (2010)).

Se ha escogido aplicar la nueva metodología en este tipo de líneas de ensamblaje porque son muy habitual en pymes de acuerdo con la experiencia del autor de la tesis y la encuesta realizada a pymes de la asociación CEAM-Metal. Para las pymes, durante la etapa de industrialización de un producto, los problemas tipo 2 son de más interés que los de tipo 1, ya que el cálculo del número de estaciones de trabajo según la demanda del cliente, previo a realizar el equilibrado de la línea, está establecido por las metodologías *Lean Manufacturing* como una buena práctica en la industria. Los problemas tipo 1, donde se requiere minimizar el número de estaciones de trabajo son de interés en etapas posteriores a la industrialización inicial.

Para la función objetivo a optimizar, Dinler et al. (2021) contempla la minimización de la desviación entre los tiempos de operación de las estaciones de trabajo. Se ha elegido esta alternativa por posibilitar una hoja de cálculo más sencilla visualmente, mejorando de esta

forma la presentación visual, lo que facilita la comprensión de la información mediante la nueva metodología matricial.

Además de acotar el tipo de línea de ensamblaje y problema, se han asumido las siguientes premisas generales:

- Las tareas de ensamblaje equivalentes son casi idénticas para cada referencia de producto gracias a la concepción del producto mediante el diseño modular-funcional expuesto en el punto 2.5.3. Se asume que solo se necesita un diagrama de precedencia para todas las referencias de producto que componen el catálogo de productos a ensamblar en la línea diseñada.
- Los tiempos de operación relacionados con las tareas de ensamblaje son considerados iguales para todas las referencias de producto debido a que, si el diseño del producto modular-funcional se realiza correctamente, dichos tiempos de operación serán casi idénticos.
- Los tiempos de operación para una tarea de ensamblaje son los mismos para todos los operarios. Se asume que tienen el mismo nivel de habilidad y los tiempos concedidos están basados en un sistema de tiempos normalizados. Cada operario trabaja en una única estación de trabajo, realizando las tareas de ensamblaje asignadas a una estación de trabajo. Esta premisa es habitual en líneas de ensamblaje rectas como la ilustrada en la figura 5a.
- Las tareas de ensamblaje se suponen indivisibles a efectos de cálculo.
- Las estaciones de trabajo son indivisibles y su número es obtenido mediante el cálculo de la cadencia (*takt time*), metodología establecida por la filosofía del *Lean Manufacturing*. Se explica en el punto 3.1.1.

- Las referencias de productos se ensamblan consecutivamente, evitando en lo posible tiempos de inactividad para lograr la máxima eficiencia.

Los parámetros e índices necesarios para definir el problema son:

W : número de estaciones de trabajo ($w = 1, 2, \dots, W$). M : número de referencias de productos incluidas en el catálogo de productos a ensamblar ($m = 1, 2, \dots, M$). F : número de posibles funcionalidades del producto ($f = 1, 2, \dots, F$). N : número de tareas de ensamblaje ($n = 1, 2, \dots, N$). El número de tareas de ensamblaje no tiene por qué coincidir con el número de funcionalidades. t_n : tiempo de una tarea de ensamblaje individual; ($n = 1, 2, \dots, N$).

En la Figura 13 se ilustra muy esquemáticamente el problema paradigmático del tipo de línea de ensamblaje estudiada y los parámetros requeridos en su definición. Las formas geométricas en la línea de transporte representan diferentes referencias de productos (m), a la que los operarios van realizando tareas de ensamblaje, para añadir funcionalidades del producto.

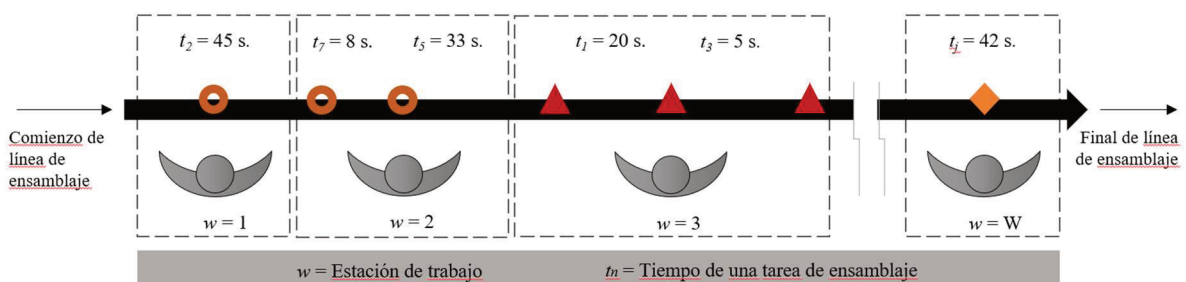


Fig. 13. Disposición línea de ensamblaje donde aplicar la metodología matricial.

Las variables del problema a definir son:

d_{wn} : variables de asignación de las tareas de ensamblaje n a las estaciones de trabajo w . Las variables d_{wn} son binarias: d_{wn} es 1 si la tarea n es asignada a la estación de trabajo w ; en caso contrario d_{wn} es 0. p_{rs} : variable de precedencia entre tareas. Las variables p_{rs} son binarias: si p_{rs} es 1 la tarea de ensamblaje r precede a la tarea de ensamblaje s ; en caso contrario p_{rs} es 0. C_m : variable de tiempo de ciclo para cada referencia de producto m . Es el tiempo máximo aceptable para fabricar la referencia de producto m .

3.1.1. Cálculo del número de estaciones de trabajo

En los problemas MMALBP tipo 2, las estaciones de trabajo W vienen fijadas. Para determinarlas se utilizan las expresiones (1) y (2) contempladas en la metodología de *takt time*, donde: t_t es el takt time. t_w es el tiempo de trabajo para todos los turnos disponible para cada estación de trabajo; c es la capacidad diaria necesaria requerida por el cliente de los productos fabricados; t_{cmax} es la mayor suma de tiempos de operación de las tareas de ensamblaje posible para cualquiera de las referencias de productos; c_s es un coeficiente de seguridad aplicado a partir de los valores históricos de eficiencia de las líneas de ensamblaje.

$$t_t = \frac{t_w}{c} \quad (1)$$

$$W \geq \frac{t_{cmax} \cdot c_s}{t_t} \quad (2)$$

3.1.2. Función objetivo y restricciones

Sin la metodología matricial propuesta, la función objetivo a minimizar del problema es la expresión (3). Representa la minimización de la suma de los tiempos de ciclo (C_m) de todas las referencias de productos incluidas en el catálogo de productos a ensamblar en una línea de ensamblaje diseñada como la de la Figura 13.

$$[\text{Min}]\Delta T = \sum_{m=1}^M C_m \quad (3)$$

Junto a la minimización de la función objetivo, se definen las siguientes restricciones a cumplir para el problema:

- Restricción 1: cada tarea de ensamblaje ha de estar asignada únicamente a una estación de trabajo.

$$\sum_{w=1}^W d_{wn} = 1 \quad n = 1, \dots, N \quad (4)$$

- Restricción 2: la asignación de las tareas de ensamblaje ha de cumplir con las restricciones de precedencia, previamente definidas para que se puedan ensamblar todas las referencias de productos. Estas restricciones son definidas de acuerdo con el criterio técnico del ingeniero de procesos.

$$\sum_{w=1}^W w \cdot d_{sw} \geq p_{rs} \cdot \sum_{w=1}^W w \cdot d_{rw} \quad r = 1, \dots, N \quad s = 1, \dots, N \mid r \neq s \quad (5)$$

- Restricción 3: se ha de cumplir con unos tiempos de ensamblaje mínimos (C_m) para cada referencia de producto m del catálogo de productos definidos de acuerdo con las previsiones de fabricación de la empresa.

$$C_m \geq \sum_{n=1}^N \sum_{w=1}^W t_{mn} \cdot d_{wn} \quad w = 1, \dots, W \quad m = 1, \dots, M \quad (6)$$

3.2. Nueva metodología matricial

El problema MMALB tipo 2 del apartado 3.1 se puede resolver mediante el uso de algoritmos de optimización, como un AG, una vez se ha planteado un modelo matemático adecuado.

Como alternativa, se propone la nueva metodología matricial para su aplicación conjunta con un algoritmo de optimización, como son los AG, con el objetivo de mejorar la transparencia algorítmica obtenida, que permita una mejor comprensión de los resultados obtenidos y los factores que influyeron en las decisiones del algoritmo aplicado.

En la nueva metodología matricial es necesario desarrollar unos pasos previos de preprocesamiento de los datos iniciales que modelizan el problema de estudio del apartado 3.1.

La nueva metodología matricial hace uso de los principios del diseño modular-funcional de productos, el *Lean manufacturing* y la ingeniería concurrente, descritos en el apartado 2.5. El diseño modular-funcional consiste en dividir las partes del producto en una lista de funcionalidades del producto que se ensamblan en diversas combinaciones para obtener las diferentes referencias de producto que componen la gama, familia o catálogo de productos.

A modo de ejemplo, en un catálogo de lavadoras se han de ensamblar: unas funcionalidades comunes (una estructura, una puerta de abertura y cierre), unas funcionalidades opcionales (función secadora, carga automática de detergente) y otras funcionalidades complementarias entre sí (diferentes versiones de velocidad de rotación angular del motor). En general, el catálogo de productos de una empresa tiene más referencias de productos que

funcionalidades del producto. Por este motivo, al plantear la nueva metodología matricial, se considera agrupar y analizar las tareas de ensamblaje por funcionalidades en lugar de por referencias de producto. Las tareas de ensamblaje clasificadas por funcionalidades del producto son las que posteriormente se reparten entre las estaciones de trabajo. El hecho de plantear la resolución del problema por funcionalidades del producto en lugar de por referencias de productos también permite reducir el coste computacional de resolución, debido a que se resuelven menos instancias del problema.

En la Figura 14 se presenta esquemáticamente los pasos de la nueva metodología matricial para resolver problemas MMALB tipo 2.

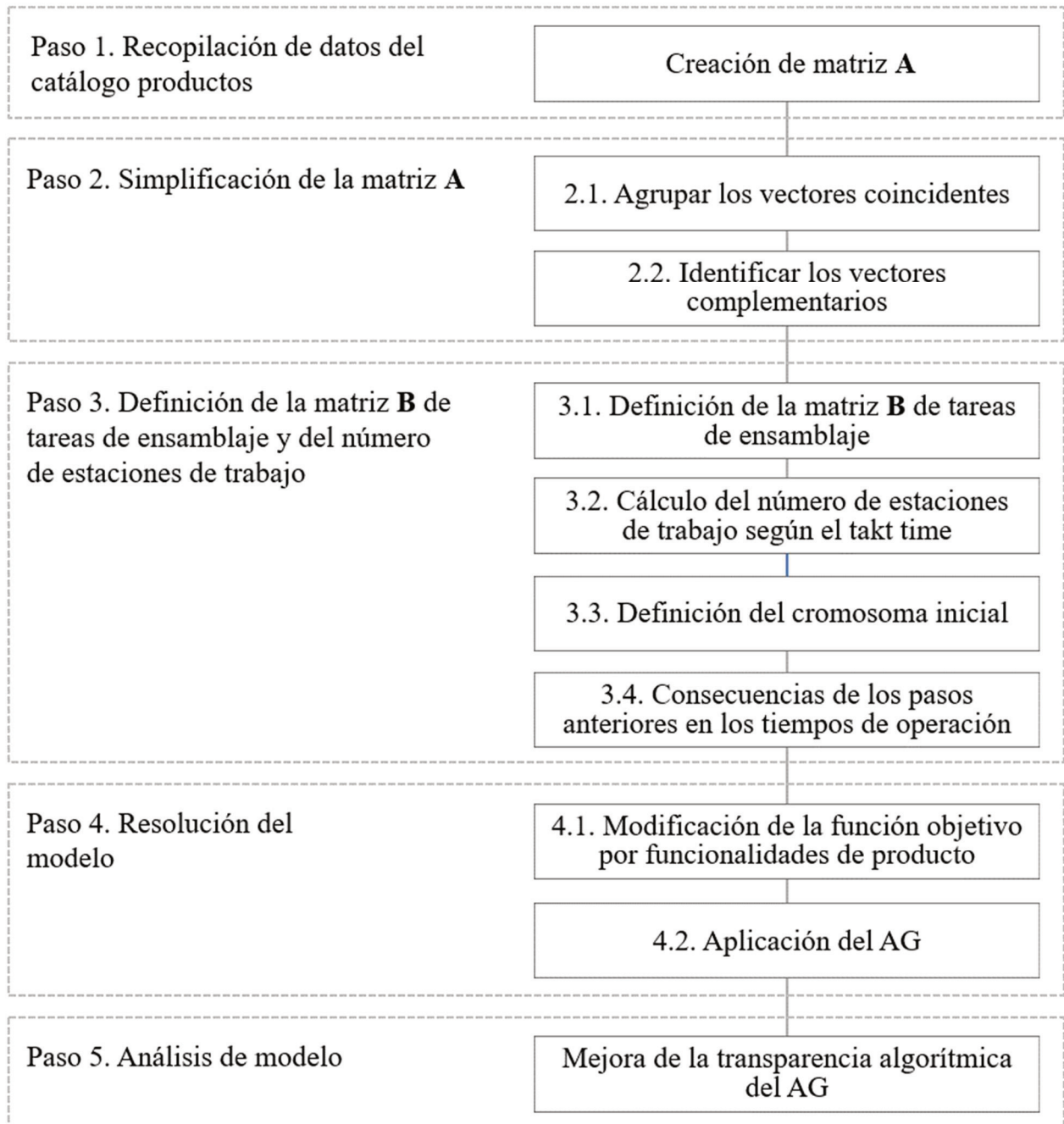


Fig. 14. Diagrama de la nueva metodología matricial

Paso 1. Recopilación de datos del catálogo de productos

El primer paso consiste en la creación de una matriz \mathbf{A} que relaciona todas las referencias de producto con todas las funcionalidades del producto.

Creación de matriz \mathbf{A}

La matriz \mathbf{A} se denomina matriz de referencias de productos y funcionalidades del producto. En general, su definición viene dada por los departamentos de diseño de producto y marketing y se proporciona a los departamentos encargados de la producción. Entonces es responsabilidad de los ingenieros de procesos diseñar una línea de ensamblaje lo más optimizada posible capaz de ensamblar el catálogo de productos completo de la empresa en términos de calidad, flexibilidad de demanda y viabilidad económica.

La matriz \mathbf{A} tiene dimensiones de M filas y F columnas, donde M es el número de referencias de productos y F es el número de funcionalidades del producto. Los valores de la matriz \mathbf{A} pueden ser 0 o 1. Si $a_{mf} = 1$, significa que la referencia del producto m incluye la funcionalidad del producto f .

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1F} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2F} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3F} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{M1} & a_{M2} & a_{M3} & \dots & a_{MF} \end{bmatrix} \quad (7)$$

La primera columna de la matriz \mathbf{A} , representa la denominada funcionalidad común del producto, que incluye los componentes de producto que son la base común de todo el catálogo de referencias de productos, encontrándose esta funcionalidad en todas las referencias. Generalmente, $a_{m1} = 1$ para cualquier m .

Paso 2. Simplificación de la matriz A

En el segundo paso, el objetivo es relacionar y agrupar diferentes funcionalidades del producto dentro de la matriz A. Esto se hace a través de dos subpasos que ayudan a interpretar qué funcionalidades del producto se pueden agrupar y cómo: agrupar los vectores coincidentes e identificar los vectores complementarios.

Paso 2.1. Agrupar los vectores coincidentes

Consiste en fusionar columnas idénticas de la matriz A en una única columna individual. A nivel de industrialización esto implica fusionar funcionalidades del producto que han sido previamente definidas como diferentes por los departamentos de diseño y que coinciden en las mismas referencias de producto.

Matemáticamente esta simplificación de k columnas idénticas de la matriz A es la expresión (8), donde: i es igual al número de ocurrencias de columnas repetidas dentro de la matriz A y r_i se define para cada ocurrencia como el número de columnas individuales que son idénticas siendo siempre $r_i \geq 2$.

$$k = \sum_1^i (r_i - 1) \quad (8)$$

Después de este paso la matriz las dimensiones de la matriz A son de M filas y $(F-k)$ columnas.

La agrupación de funcionalidades del producto se realiza porque posteriormente facilita la obtención de soluciones que producen un mejor equilibrado de la línea de ensamblaje por parte del AG. Esto se debe a que, tal y como se habían definido inicialmente algunas de las funcionalidades del producto y su relación con las posteriores tareas de ensamblaje, los tiempos

de operación no son suficientemente grandes. Al agrupar funcionalidades del producto, se consigue agrupar tareas de ensamblaje que produce tiempos totales de operación mayores, que permiten lograr una distribución más equitativa de las tareas de ensamblaje entre las estaciones de trabajo.

Paso 2.2. Identificar los vectores complementarios

Los vectores complementarios dentro de la matriz **A** se definen como vectores columnas que, agrupados, su suma da como resultado otro vector columna existente en **A**. A diferencia del paso 2.1, la identificación de vectores complementarios no reduce el rango de la matriz **A** y no se fusionan columnas.

Los vectores complementarios agregados pueden resultar tanto en el vector columna unitario, que es la funcionalidad común del producto ($a_{m1} = 1$), como en otro vector columna de **A**. Un ejemplo de agrupación de vectores complementarios para una matriz **A** dada se muestra en la expresión (9). Se puede observar cómo las columnas 2 y 3 (funcionalidad del producto 2 y 3) son columnas complementarias que, una vez agregadas, dan como resultado la funcionalidad común del producto, caso muy frecuente en los procesos de industrialización de productos reales.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \boxed{1} & \boxed{0} & \dots & a_{1(F-k)} \\ a_{21} & \boxed{1} & \boxed{0} & \dots & a_{2(F-k)} \\ a_{31} & \boxed{0} & \boxed{1} & \dots & a_{3(F-k)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{M1} & \boxed{0} & \boxed{1} & \dots & a_{M(F-k)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Otro ejemplo de vectores complementarios se presenta en la matriz \mathbf{A} de la expresión (10). En este caso las columnas 5 y 6 (funcionalidades del producto 5 y 6), si se agregan, dan como resultado la columna 4 (funcionalidad de producto 4), que no contiene todos los valores igual a 1.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \boxed{1} & 1 & 0 & \dots & a_{1(F-k)} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \boxed{0} & 0 & 0 & \dots & a_{2(F-k)} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \boxed{1} & 0 & 1 & \dots & a_{3(F-k)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{M1} & a_{M2} & a_{M3} & \boxed{1} & 1 & 0 & \dots & a_{M(F-k)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Es posible encontrar combinaciones alternativas en la identificación de vectores complementarios. Con el objetivo de obtener una transparencia algorítmica significativa para los ingenieros de procesos, es recomendable identificar alternativas con vectores complementarios que representen funcionalidades del producto relacionadas por su utilidad y por las herramientas de fabricación necesarias. Con esta elección previa manual de las mejores alternativas de vectores complementarios, se incluyen en la modelización matemática del problema las complementariedades naturales del sistema, definiendo implícitamente restricciones adicionales que orientan a la obtención de resultados válidos por parte de un AG en términos de su lógica de industrialización. Esto ayuda a mejorar la viabilidad de las soluciones, sin requerir su programación explícita, simplificando la definición de modelo realizada por el ingeniero de procesos. En el capítulo 4, con un ejemplo, se muestra la identificación de un posible vector complementario no factible a nivel de su posterior industrialización.

Se considera que, para la mayoría de las pymes, esta elección de vectores complementarios de la metodología matricial se puede abordar de forma manual, ya que el

número de posibles funcionalidades del producto que son complementarias suele ser bastante limitado.

La identificación de los vectores complementarios permite comprender la relación entre tareas de ensamblaje complementarias asociadas a estas funcionalidades del producto y cómo pueden afectar a los resultados de equilibrar líneas de ensamblaje. Desglosar la distribución de las tareas de ensamblaje de esta manera, facilita la comprensión de los resultados proporcionados por un AG, lo que conlleva a una mejora de la transparencia algorítmica.

Cuando se equilibran los tiempos de operación de las tareas de ensamblaje, es poco probable que estas funcionalidades del producto complementarias tengan tiempos de operación idénticos en cada estación de trabajo. En consecuencia, solo el tiempo mínimo de operación asignado a las tareas de ensamblaje afectadas por estas funcionalidades complementarias del producto puede equilibrarse junto con el tiempo de operación de las funcionalidades agregadas del producto.

El tiempo restante que queda en las funcionalidades del producto con tiempos de operación superiores al tiempo mínimo asignado, denominada deuda, ayuda a identificar los desequilibrios sistémicos en la solución proporcionada por el AG al equilibrar una línea de ensamblaje. La identificación de estos desequilibrios sistémicos ayuda a orientar las decisiones a tomar como, por ejemplo, modificar equipos de fabricación existente en las estaciones de trabajo, lo que conlleva también a una mejora en la transparencia algorítmica.

Paso 3. Definición de la matriz **B de tareas de ensamblaje y del número de estaciones de trabajo**

Paso 3.1. Definición de la matriz **B** de tareas de ensamblaje

El tercer paso incluye la preparación de la matriz de operaciones y funcionalidades del producto, denominada matriz **B**.

Tiene dimensiones de N filas y $(F - k)$ columnas, donde N son el número de tareas de montaje necesarias para montar todas las referencias de producto y $(F - k)$ es el número de funcionalidades del producto que quedan después de agrupar vectores coincidentes e identificar vectores complementarios con sentido para su industrialización; estos últimos no reducen el rango de la matriz **A** ni de **B**. Se presenta la forma genérica de la matriz **B** con la expresión (11).

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1(F-k)} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2(F-k)} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & \dots & b_{3(F-k)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{N1} & b_{N2} & b_{N3} & \dots & b_{N(F-k)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Los valores de **B** puede ser 0 o 1. Si $b_{nf} = 1$, significa que para implementar la funcionalidad f a una referencia del producto, la tarea de ensamblaje n es requerida. La matriz **B**, a diferencia de la matriz **A**, es definida por el departamento de producción en base a las herramientas, habilidades y conocimientos previos sobre los procesos de fabricación de la empresa. Las tareas de ensamblaje deben definirse como indivisibles debido al uso de herramientas o materiales de ensamblaje específicos.

El tiempo de operación de cada tarea de ensamblaje, se obtiene de dividirla en tareas básicas y calcular los tiempos de operación de estas tareas básicas utilizando sistemas de medición de tiempo tabulados o experimentales.

Se define una matriz diagonal \mathbf{T} cuadrada de dimensiones $N \cdot N$ que contiene en la diagonal los tiempos de operación individuales (t_n) para cada tarea de ensamblaje. La matriz diagonal \mathbf{T} es necesaria para los siguientes pasos de la nueva metodología matricial.

Paso 3.2. Cálculo del número de estaciones de trabajo según el takt time

Con la nueva metodología, las estaciones de trabajo W también vienen fijadas de acuerdo con el *takt time* y las expresiones (1) y (2), pero en función del tiempo de las funcionalidades del producto, a diferencia de su resolución sin la metodología, donde los tiempos se definían por referencias de producto. La misma definición aplica a t_w , c y c_s . La única diferencia existente es la definición de $t_{c_{max}}$, que se calcula sumando los tiempos de todas las funcionalidades del producto, excepto aquellas que hayan sido identificadas previamente como funcionalidades complementarias del producto. Para estas funcionalidades del producto complementarias, solo se agrega el tiempo de operación (t_n) más alto entre las que componen cada una de las complementariedades.

Paso 3.3. Definición del cromosoma inicial

Este tipo de problema matemático se resuelve mediante algoritmos de optimización, como los AG, descritos en el apartado 2.3. El resultado proporcionado por un algoritmo de optimización es la adjudicación de las distintas tareas de ensamblaje a las estaciones de trabajo (d_{wn}),

Debido a la naturaleza iterativa del AG, es necesario generar un vector de soluciones con una asignación inicial de cada tarea de ensamblaje a una estación de trabajo, a partir del cual el AG inicia la resolución. De acuerdo con la nomenclatura típica de los AG, a este vector de soluciones se le llama cromosoma.

Para cada estación de trabajo se genera un vector fila \mathbf{d}_w de dimensión N con la expresión (12)

$$\mathbf{d}_w = [d_{w1} \quad d_{w2} \quad d_{w3} \quad \dots \quad d_{wN}] \quad (12)$$

La expresión (13) expresa la suma de los vectores \mathbf{d}_w multiplicados por el número de estación de trabajo w asignado y es el cromosoma total ($chrom_{1..N}$) que debe iterar el AG.

$$chrom_{1..N} = \sum_1^w w \cdot \mathbf{d}_w \quad (13)$$

El AG realiza iteraciones hasta encontrar los valores de la expresión (13) que minimizan el valor de la función objetivo (3) y cumplen con las restricciones definidas en (4) - (6). La minimización de ΔT se obtiene mediante el AG, actuando como función de aptitud. Las funciones de aptitud se utilizan en los AG para guiar las simulaciones hacia la solución óptima. Una función de adecuación es un tipo particular de función objetivo que se utiliza para resumir, como una única figura de mérito, qué tan cerca está una solución dada de lograr el objetivo.

Puntualizar que este paso 3.3 es independiente de utilizar solamente el AG o un AG junto con la nueva metodología matricial. Las expresiones (12) y (13) son válidas en ambos casos.

Paso 3.4. Consecuencias de los pasos anteriores en los tiempos de operación

La asignación de los tiempos de operación a cada estación de trabajo individual se obtiene con la expresión (14). Para cada estación de trabajo w , \mathbf{tw}_w es un vector fila de dimensión N .

$$\mathbf{tw}_w = \mathbf{d}_{wn} \cdot \mathbf{T} \quad (14)$$

Los tiempos de operación de todas las estaciones de trabajo individuales se agrupan en una sola matriz \mathbf{TW} con la expresión (15). La matriz \mathbf{TW} tiene tantas filas como estaciones de trabajo (W) y tantas columnas como tareas de ensamblaje (N). Los t_{wn} representan el tiempo de operación de la tarea de ensamblaje n asignado a la estación de trabajo w .

$$\mathbf{TW} = \begin{bmatrix} \mathbf{tw}_1 \\ \mathbf{tw}_2 \\ \mathbf{tw}_3 \\ \dots \\ \mathbf{tw}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & \dots & t_{1N} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & \dots & t_{2N} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & \dots & t_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{W1} & t_{W2} & t_{W3} & \dots & t_{WN} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Con la expresión (16) se obtiene la matriz \mathbf{TWF} , que es una matriz de W filas y $(F - k)$ columnas. Cada elemento de la matriz, twf_{wf} , representa el tiempo de operación asignado de ensamblar la funcionalidad del producto f a la estación de trabajo w .

$$\mathbf{TWF} = \mathbf{TW} \cdot \mathbf{B} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & \dots & t_{1N} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & \dots & t_{2N} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & \dots & t_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{W1} & t_{W2} & t_{W3} & \dots & t_{WN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1(F-k)} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2(F-k)} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & \dots & b_{3(F-k)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{N1} & b_{N2} & b_{N3} & \dots & b_{N(F-k)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

De acuerdo con lo explicado en el paso 2.2, los valores de \mathbf{TWF} deben corregirse considerando las funcionalidades del producto complementarias previamente identificadas.

Para cada estación de trabajo w , la suma mínima de los tiempos de asignación twf_{wf} entre las funcionalidades del producto que son complementarias, se suma a los tiempos de asignación twf_{wf} de la funcionalidad agregada.

El valor de tiempo twf_{wf} se incrementa con la funcionalidad del producto agregado. Los valores sobrantes, definidos como la diferencia entre el mínimo twf_{wf} y los twf_{wf} de las funcionalidades del producto complementarias que tienen un twf_{wf} mayor que este mínimo, son valores de deuda descritos en el paso 2.2.

Los valores de deuda que no son iguales a cero no pueden ser minimizados por el AG. Para convertirlos en cero se requiere modificar cómo se realizan las tareas de ensamblaje y en consecuencia modificar el tiempo de operación asignado.

Para mayor claridad en el proceso, se proporciona un ejemplo de cómo se agregan tiempos de operación en la matriz **TWF** entre funcionalidades del producto que se han identificado como complementarias. Se considera que la funcionalidad del producto 2 y la funcionalidad del producto 3 son complementarias y su adición vectorial resulta en la funcionalidad común del producto 1 que es un vector columna unitario. Esto en la matriz **TWF** se ve reflejado agregando los tiempos de operación tal y como se observa en la expresión (17) dando lugar una nueva matriz **TWF'**, con algunos nuevos tiempos de operación modificados

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{TWF}' = \\
 & \left[\begin{array}{cccc}
 twf_{11} + \min(twf_{12}, twf_{13}) & twf_{12} - \min(twf_{12}, twf_{13}) & twf_{13} - \min(twf_{12}, twf_{13}) & \dots & twf_{1 \cdot (F-k)} \\
 twf_{21} + \min(twf_{22}, twf_{23}) & twf_{22} - \min(twf_{22}, twf_{23}) & twf_{23} - \min(twf_{22}, twf_{23}) & \dots & twf_{2 \cdot (F-k)} \\
 twf_{31} + \min(twf_{32}, twf_{33}) & twf_{32} - \min(twf_{32}, twf_{33}) & twf_{33} - \min(twf_{32}, twf_{33}) & \dots & twf_{3 \cdot (F-k)} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 twf_{w1} + \min(twf_{w2}, twf_{w3}) & twf_{w2} - \min(twf_{w2}, twf_{w3}) & twf_{w3} - \min(twf_{w2}, twf_{w3}) & \dots & twf_{w \cdot (F-k)}
 \end{array} \right]
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Capítulo 3. Nueva metodología matricial para mejorar la transparencia algorítmica.

Los tiempos de operación de las tareas de ensamblaje asociadas a funcionalidades del producto que no han sido agregadas por el método de vectores coincidentes o complementarios permanecen iguales, twf_{wf} .

Los twf_{wf} que se modifican debido a identificar vectores complementarios se denominan twf'_{wf} en **TWF'**. Así, $twf'_{11} = twf_{11} + \min(twf_{12}, twf_{13})$, $twf'_{12} = twf_{12} - \min(twf_{12}, twf_{13})$.

TWF' proporciona una nueva modelización del problema descrito en el apartado 3.1 que refleja de forma más clara la asignación de las tareas de ensamblaje para cada estación de trabajo, permitiendo identificar más fácilmente los valores de deuda que representan los desequilibrios sistémicos presentes en la línea de ensamblaje propuesta por el AG, cosa que no se consigue con el uso de un AG sin la metodología matricial, aportando una mejora en la transparencia algorítmica del modelo matemático planteado.

Paso 4. Resolución del modelo

Una vez planteado el modelo matemático del problema con las expresiones (4), (5) y (6) y aplicando los pasos anteriores, se han ordenado las variables y los parámetros de entrada. Dado un valor inicial del cromosoma de la expresión (13), se consigue un valor inicial de la matriz **TWF'** que no es óptimo. El objetivo es ahora optimizar los valores de la matriz **TWF'** iterando el valor del cromosoma por medio de un AG.

Para mejorar la transparencia algorítmica de las variables de salida del AG se ha de modificar la función objetivo de la expresión (3) para adaptarla al diseño modular-funcional que reparte los tiempos de operación de las tareas de ensamblaje por funcionalidades del producto y no por referencias de producto.

Paso 4.1. Modificación de la función objetivo por funcionalidades del producto

La nueva metodología matricial propone utilizar como función objetivo la minimización de la desviación estándar de los tiempos de operación agregados, asignados a cada una de las estaciones de trabajo, para cada grupo de funcionalidades del producto. Este cambio se propone para conseguir una mejor transparencia algorítmica y facilitar su implementación en hojas de cálculo al ser una función preconfigurada. La eficacia de utilizar desviaciones estándar como función objetivo y aplicar un AG es probada por Dinler et al. (2021).

Las variables de salida a optimizar son los valores escalares twf_{wf} o twf'_{wf} (en caso de haber agregado funciones del producto complementarias) de la matriz **TWF'** que representan la suma de todos los tiempos de funcionamiento de las tareas de ensamblaje asignadas a una única estación de trabajo w para una de las funcionalidades del producto f . La

formulación de la nueva función objetivo se presenta en la expresión (18), donde $\overline{twf_{wf}}$ es el valor promedio.

$$[\text{Min}]\Delta T = \text{Min} \left(\frac{\sum_{f=1}^{F-k} \sqrt{\frac{\sum_{w=1}^W (twf_{wf} - \overline{twf_{wf}})^2}{W}}}{F - k} \right) \quad (18)$$

Las restricciones a cumplir son también las expresiones de la (4), (5) y (6).

Si se quiere considerar previsiones de ventas diferentes para cada referencia de producto a industrializar, implica que en el equilibrado se ha de priorizar las referencias de producto que van a ser ensambladas más habitualmente. Para ello se ha de tener en cuenta una previsión de ventas de cara a lograr el equilibrado óptimo.

Si se define un vector fila \mathbf{p} de dimensión F cuyas componentes escalares (p_f) son los valores porcentuales de previsión de ventas para cada una de las funcionalidades del producto, derivadas de la previsión de ventas de cada referencia de producto.

$$\mathbf{p} = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad \dots \quad p_F] \quad (19)$$

Incluir la previsión de ventas transforma la función objetivo presentada en la expresión (18) en la expresión (20)

$$[\text{Min}]\Delta T = \text{Min} \left(\frac{\sum_{f=1}^{F-k} p_f \sqrt{\frac{\sum_{w=1}^W (twf_{wf} - \overline{twf_{wf}})^2}{W}}}{F - k} \right) \quad (20)$$

Paso 4.2. Aplicación del AG

Las etapas para la aplicación del AG conjuntamente con la nueva metodología matricial en un programa informático se listan a continuación:

1. Asignar aleatoriamente tareas de ensamblaje a las estaciones de trabajo requeridas creando el cromosoma inicial con la expresión (13).
2. Calcular valores ΔT de la función objetivo con el cromosoma inicial hasta conseguir el mejor y más cercano resultado al objetivo correspondiente a minimizar ΔT .
3. Modificar parámetros del solucionador (*solver*) asociados al AG, tales como los operadores genéticos de reproducción, cruzamiento y mutación a la generación actual para producir la siguiente iteración.
4. Seleccionar los cromosomas más competentes de la nueva generación en base a los valores ΔT de la función objetivo.
5. Volver a la etapa 3 hasta cumplir la condición de parada fijada en el solucionador del AG. Esta condición puede ser, por ejemplo, un tiempo computacional transcurrido sin una mejora en el valor ΔT de la función objetivo.
6. Obtener el valor del cromosoma final, que es la mejor solución para el equilibrado de la línea de ensamblaje y genera el valor óptimo de la matriz de salida de resultados **TWF'** propuesta en el paso final de la nueva metodología matricial.

Con el fin de mejorar la introducción de estas metodologías en las pymes, se elige el AG por su sencilla implementación a través de hojas de cálculo. Esta elección del AG se debe a la naturaleza NP-hard de los problemas de MMALB, dada la eficiencia de dicho algoritmo de acuerdo a Pinarbasi et al. (2020).

Paso 5. Análisis del modelo

Se consiguen las siguientes mejoras que se destacan en este paso final, cuando se realiza el análisis de los resultados obtenidos al resolver un problema MMALB tipo 2, mediante la aplicación de un AG conjuntamente con la nueva metodología matricial.

Mejora de la transparencia algorítmica del AG

El resultado final obtenido son los valores optimizados de la matriz **TWF'**.

La mejora de la transparencia algorítmica se consigue con el análisis de los valores twf_{wf} (o twf'_{wf} en caso de haber agregado funcionalidades del producto complementarias) conjuntamente con la determinación de las desviaciones estándar por funcionalidades del producto para cada estación de trabajo por columnas de la matriz **TWF'**. Gracias al análisis de la modelización final de los resultados conseguidos con la nueva metodología matricial se distinguen dos casos de interés al analizar el equilibrado de las líneas de ensamblaje obtenido y demuestra la mejora de la transparencia algorítmica, dando respuesta a situaciones industriales habituales.

Caso 1: Funcionalidades del producto no complementarias

Los desequilibrios observados en las funcionalidades del producto corresponden a una cantidad insuficiente de tareas de ensamblaje o a tiempos de operación muy diferentes entre las tareas de ensamblaje. A pesar de tener tiempos de operación agrupados por vectores coincidentes y por vectores complementarios, en muchos casos no es factible encontrar un equilibrio total entre las estaciones de trabajo y las tareas de ensamblaje asignadas por funcionalidades del producto.

Estos desequilibrios sistémicos o deudas pueden ser corregidos modificando las herramientas de fabricación, reduciendo algunos de los tiempos de operación o atomizando aún más, si se puede, el desglose de las tareas de montaje en tareas básicas.

Cualquier acción realizada que reduzca estas deudas detectadas en la nueva metodología matricial contribuye a poder encontrar un mejor equilibrado de la línea de ensamblaje para todo el catálogo de productos.

Caso 2: Funcionalidades del producto complementarias

Las funcionalidades del producto aportan una parte de los tiempos de operación de sus tareas de ensamblaje para aumentar el tiempo de operación de la cantidad de tareas de ensamblaje de las funcionalidades del producto agregadas, específicamente con el valor del mínimo twf_{wf} en cada estación de trabajo. Esta contribución ayuda a mejorar la distribución entre las estaciones de trabajo de tales funcionalidades del producto añadidas.

Para cada funcionalidad del producto y en cada estación de trabajo, una vez restado el mínimo de las funcionalidades del producto complementarias, queda una diferencia que puede ser cero para la funcionalidad del producto que marca el tiempo mínimo, o superior.

Si $twf'_{wf} \neq 0$, esta deuda se clasifica como un resto. Los restos de twf'_{wf} muestran una variabilidad indeseable de tiempo entre las estaciones de trabajo, señalando claramente los desequilibrios sistémicos provocados por estas funcionalidades del producto. Así, se obtiene una guía que indica que, si se quiere obtener una línea de ensamblaje mejor equilibrada, son estas funcionalidades del producto las que se han de analizar por el departamento de diseño para tomar decisiones en cuanto a modificar las tareas de ensamblaje.

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA MATRICIAL A UN EJEMPLO

En este capítulo se implementa la nueva metodología matricial del capítulo 3 a un ejemplo de problema del equilibrado de líneas de ensamblaje tipo MMALB tipo 2 en líneas de disposición lineal, de un solo lado. El ejemplo se resuelve primero con el uso sólo del AG y después con la metodología matricial aplicada conjuntamente con un AG. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos en cuanto a la transparencia algorítmica conseguida y coste computacional de resolución. El ejemplo se ha desarrollado como un ejemplo industrial paradigmático y de interés para pymes mayoritariamente del sector del metal, empresas todas ellas asociadas a CEAM-Metal y que han contestado a la encuesta del capítulo 2.

4.1.Descripción del ejemplo paradigmático








El ejemplo industrial se ha planteado sobre un catálogo de productos correspondiente al ensamblaje de un vehículo y los diferentes modelos o variantes que se pueden ofrecer. Se ha escogido un producto paradigmático en cuanto al diseño modular-funcional creado por el diseñador López et al. (2015) con la intención de diseño de poder fabricar múltiples referencias de producto fácilmente a partir de las funcionalidades del producto predefinidas. El diseño modular-funcional se ha planteado de una forma muy simplificada para facilitar la comprensión de la nueva metodología matricial.

El ejemplo del ensamblaje simplificado de un vehículo y sus variantes es paradigmático para empresas del sector de la automoción que son proveedores nivel 3 (Tier 3) o superior, entre las que se encuentran varias empresas que son pymes y pertenecientes a la asociación CEAM-Metal. El ejemplo respeta la confidencialidad de la información proporcionada en las entrevistas realizadas en el apartado 2.6.

Capítulo 4. Aplicación de la nueva metodología matricial a un ejemplo.

En la Tabla 2 se muestra un esquema simplificado de las funcionalidades del producto disponible a partir de las que se generan las referencias de producto a fabricar según el criterio del departamento de marketing o incluso por elección del cliente. Se plantea un catálogo de productos correspondiente a un vehículo en el cual se le pueden añadir 8 funcionalidades del producto ($F=8$). Añadiendo más o menos funcionalidades del producto, da lugar a diferentes referencias de producto. En la Tabla 2 se han ilustrado en la última columna solo 3 referencias de producto como ejemplos gráficos, si bien podría haber muchas más. Hay que destacar que, en los procesos industriales reales con alto grado de personalización, suele haber más referencias que funcionalidades del producto.

Tabla 2. Catálogo de productos a ensamblar: el vehículo y sus variantes López et al. (2015)

Funcionalidades del producto, f						
<u>Común</u> 1	<u>Chasis</u> 2/3/4	<u>Puertas del.</u> 5	<u>Puertas tras.</u> 6	<u>Aire acond.</u> 7	<u>Clima</u> 8	
	 Familiar	Sí	Sí	Opción	Opción	
	 Furgoneta	Sí	No	No	No	
	 Pick-up	Sí	No	No	No	

En la nueva metodología matricial no se requiere considerar el número de referencias de producto que el departamento de marketing ofrece al mercado inicialmente, ya que la resolución del problema se lleva a cabo de manera global para la industrialización del catálogo de productos completo, permitiendo añadir posteriormente al mercado más referencias de producto.

Capítulo 4. Aplicación de la nueva metodología matricial a un ejemplo.

En la resolución mediante el uso únicamente del AG, sí se han de definir todas las referencias de producto que se ofrecen al mercado inicialmente ya que las nuevas referencias no son contempladas en el equilibrado de la línea de ensamblaje. Así, en el ejemplo de problema, se han considerado inicialmente un total de 4 referencias de producto, correspondiente a las siguientes funcionalidades: 3 tipos de chasis posibles (familiar, furgoneta o pick-up) y en el chasis familiar se ofrecen 2 opciones de prestaciones de confort en la regulación de la temperatura del habitáculo (aire acondicionado y climatizador). A posteriori es lógico pensar que se puedan ensamblar los otros dos tipos de chasis con las 2 opciones de aire acondicionado, generando nuevas referencias de producto.

La Tabla 3 define 20 tareas de ensamblaje ($N=20$) necesarias para implementar las 8 funcionalidades del producto definidas en la Tabla 2. Para cada tarea de ensamblaje se estima el tiempo de operación individual (t_n), mediante técnicas de medición del tiempo (MTM, n.d.) y del conocimiento que se tiene del propio proceso industrial. Así por ejemplo para instalar la funcionalidad de producto correspondiente al aire acondicionado ($f=7$) se necesitan las tareas de ensamblaje número 15 y 16 de instalar el aire acondicionado y chequear el aire acondicionado.

Tabla 3. Tareas de ensamblaje y tiempos de operación individuales

<i>Tarea de ensamblaje (n)</i>	<i>Tiempo, t_n[min]</i>	<i>Tarea de ensamblaje (n)</i>	<i>Tiempo, t_n[min]</i>
1) Colocar chasis	20	11) Ensamblar puesta delantera	10
2) Ensamblar ruedas	15	12) Ensamblar cristal delantero	5
3) Cablear chasis	25	13) Ensamblar puerta trasera	15
4) Colocar alfombrillas	5	14) Ensamblar cristal trasero	5
5) Ensamblar bastidor familiar	20	15) Ensamblar aire acondicionado	10
6) Atornillar bastidor familiar	10	16) Chequear aire acondicionado	10
7) Ensamblar bastidor furgoneta	15	17) Ensamblar climatizador	15
8) Atornillar bastidor furgoneta	7	18) Chequear climatizador	10
9) Ensamblar bastidor pick up	10	19) Chequeo general	10
10) Atornillar bastidor pick up	5	20) Embalaje	5

La Tabla 3 da lugar finalmente a un vector fila t_n de dimensión $1 \cdot 20$, que sirve para definir la diagonal de la matriz **T** usada en la expresión (14) para la asignación de los tiempos de operación a cada estación de trabajo individual.

La Figura 15 define el diagrama de precedencias entre las 20 tareas de ensamblaje definidas. Con ello se definen las restricciones de precedencia existentes para ensamblar cualquier referencia de producto en la línea de ensamblaje.

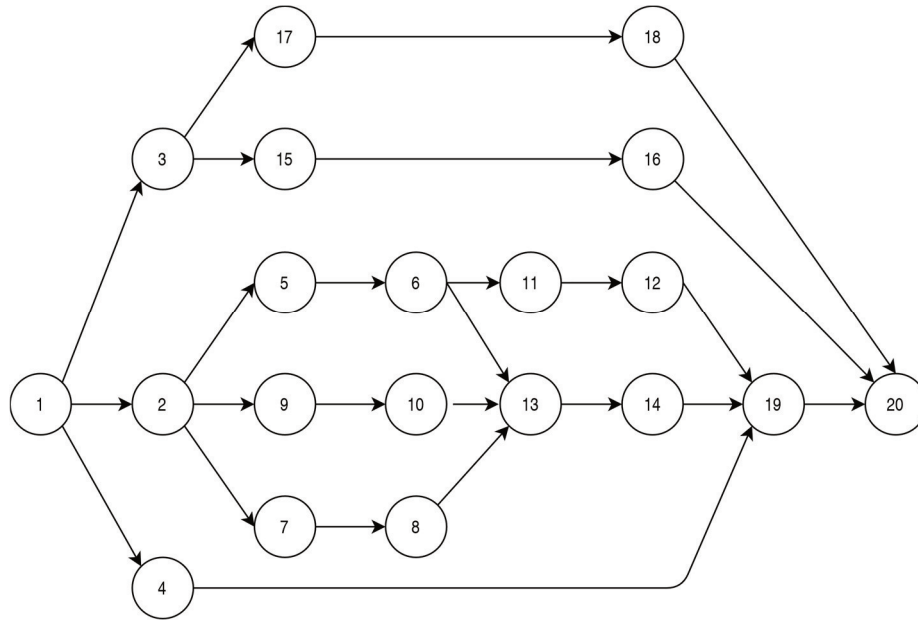


Fig. 15. Diagrama de precedencia de tareas de ensamblaje

El número de estaciones de trabajo se obtiene con el *takt-time*, tal y como se ha explicado en el apartado 3.1.1

En este ejemplo, la demanda del cliente se ha establecido en 1500 vehículos al año ($c=1500$), asumiendo un factor de seguridad de $c_s = 1,2$. El tiempo disponible para fabricar estas unidades es de 250 días laborables en turnos de 8 h, dando lugar a 120.000 min disponibles de producción. Con la información de las Tablas 2, 3 y 4 el tiempo máximo (t_{cmax}) para ensamblar cualquier referencia de producto que contenga cualquiera de las funcionalidades del producto es de 170 min. Este t_{cmax} corresponde a la referencia de producto con un mayor sumatorio de tiempos de operación entre todas las posibles que se pueden generar a partir del cuadro de funcionalidades del producto representado en la Tabla 2, independientemente de si se ha lanzado al mercado o no por parte del departamento de marketing.

Con la expresión (2) se obtiene el número requerido de 3 estaciones de trabajo ($W = 3$).

Al haber 3 estaciones de trabajo se tienen que definir 3 vectores d_w (d_1, d_2, d_3) que representan la distribución de las tareas de ensamblaje en cada estación de trabajo. En la Tabla 4 se define la distribución inicial no óptima de las tareas de ensamblaje entre las estaciones de trabajo.

Tabla 4. Asignación inicial de las tareas de ensamblaje a las estaciones de trabajo.

<i>Tareas de ensamblaje, n</i>	d_w	d_1	d_2	d_3
1) Colocar chasis	d_{w1}	1	0	0
2) Ensamblar ruedas	d_{w2}	1	0	0
3) Cablear chasis	d_{w3}	1	0	0
4) Colocar alfombrillas	d_{w4}	1	0	0
5) Ensamblar bastidor familiar	d_{w5}	1	0	0
6) Atornillar bastidor familiar	d_{w6}	1	0	0
7) Ensamblar bastidor furgoneta	d_{w7}	0	1	0
8) Atornillar bastidor furgoneta	d_{w8}	0	1	0
9) Ensamblar bastidor pick up	d_{w9}	0	1	0
10) Atornillar bastidor pick up	d_{w10}	0	1	0
11) Ensamblar puesta delantera	d_{w11}	0	1	0
12) Ensamblar cristal delantero	d_{w12}	0	1	0
13) Ensamblar puerta trasera	d_{w13}	0	0	1
14) Ensamblar cristal trasero	d_{w14}	0	0	1
15) Ensamblar aire acondicionado	d_{w15}	0	0	1
16) Chequear aire acondicionado	d_{w16}	0	0	1
17) Ensamblar climatizador	d_{w17}	0	0	1
18) Chequear climatizador	d_{w18}	0	0	1
19) Chequeo general	d_{w19}	0	0	1
20) Embalaje	d_{w20}	0	0	1

La Tabla 4 define el valor del cromosoma inicial con la expresión (13) para empezar a iterar con el AG. El cromosoma inicial contiene valores entre 1 y 3, identificando la estación de trabajo en donde está asignada cada tarea de ensamblaje. Se obtiene la expresión (21):

$$chrom_{1,20} = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3) \quad (21)$$

En la Tabla 5 se resumen las variables y los parámetros del ejemplo, de acuerdo con lo explicado en la sección 3.1 sobre la descripción del problema a resolver.

Tabla 5. Datos del ejemplo.

Parámetros del problema	
Estaciones de trabajo (W)	$w= 1, 2, W=3;$
Referencias de productos (M)	$m= 1, 2, \dots, M=4;$
Funcionalidades del producto (F)	$f= 1, 2, \dots, F=8;$
Tareas de ensamblaje (N)	$n= 1, 2, \dots, N=20;$
Tiempos tareas de ensamblaje (t_n)	Tabla 3
Asignación tareas de ensamblaje a las estaciones de trabajo (d_{wn})	$w= 1, 2, W=3;$ $n= 1, 2, \dots, N=20;$
Restricciones	
Asignación de cada tarea de ensamblaje a una única estación de trabajo	$\sum_{w=1}^{W=3} d_{wn} = 1 \quad n = 1, \dots, N = 20$
Relaciones de precedencia (p_{rs})	Figura 15
Relaciones de precedencia	$\sum_{w=1}^{W=3} w \cdot d_{sw} \geq p_{rs} \cdot \sum_{w=1}^{W=3} w \cdot d_{rw}$ $r = 1, \dots, N = 20 \quad s = 1, \dots, N = 20 \mid r \neq s$

4.2.Planteamiento y resolución con solo un AG

Las soluciones de las funciones objetivos se obtienen con un programa informático que tenga implementado un solucionador (solver) con algoritmos de optimización y en concreto AG. Se ha optado por resolver con el programa informático Microsoft Excel en lugar de otras opciones como MATLAB (MathWorks et al. (n.d.)), ARENA (Sime et al. (2019)) o WITNESS (Wang et al. (2017)), por ser de gran uso entre las pymes simplemente como hojas de cálculo, lo que ha de facilitar la implementación de la metodología, debido al uso de un programa habitual en entornos industriales.

4.1.1. Planteamiento con sólo un AG

El enfoque más habitual en la literatura especializada para resolver el ejemplo consiste en aplicar directamente un algoritmo de optimización, en este caso se plantea un algoritmo genético (AG). Para asignar las 20 tareas de ensamblaje a las 3 estaciones de trabajo, el enfoque habitual consiste en organizar el problema en función de las referencias de producto iniciales definidas por el departamento de marketing, que inicialmente han sido 4 referencias de producto. De esta forma se obtiene la Tabla 6 que permite ver las tareas de ensamblaje que son necesarias para ensamblar cada referencia de producto.

El tiempo máximo de la suma de tiempos de operación de las tareas de ensamblaje de 170 min corresponde a ensamblar la referencia de producto 4. En este ejemplo, el tiempo máximo para cualquier referencia de producto, coincide con una referencia de producto que se ha lanzado inicialmente, pero no tiene por qué ser así. En el caso del uso de sólo un AG, al considerar únicamente las referencias de producto lanzadas inicialmente, es factible ninguna de estas referencias de producto sea la de tiempo máximo, lo que dificulta industrializar a

posteriori referencias de producto con tiempo mayor. Este problema queda resuelto con la nueva metodología matricial.

Tabla 6. Tareas de ensamblaje y su ocurrencia en las referencias de producto.

<i>Tareas de ensamblaje, n</i>	m_1	m_2	m_3	m_4
1) Colocar chasis	1	1	1	1
2) Ensamblar ruedas	1	1	1	1
3) Cablear chasis	1	1	1	1
4) Colocar alfombrillas	1	1	1	1
5) Ensamblar bastidor	1	0	0	1
6) Atornillar bastidor	1	0	0	1
7) Ensamblar bastidor	0	1	0	0
8) Atornillar bastidor	0	1	0	0
9) Ensamblar bastidor	0	0	1	0
10) Atornillar bastidor	0	0	1	0
11) Ensamblar puesta	1	1	1	1
12) Ensamblar cristal	1	1	1	1
13) Ensamblar puerta	1	0	0	1
14) Ensamblar cristal	1	0	0	1
15) Ensamblar aire	1	1	0	0
16) Chequear aire	1	1	0	0
17) Ensamblar	0	0	0	1
18) Chequear	0	0	0	1
19) Chequeo general	1	1	1	1
20) Embalaje	1	1	1	1

$$C_m \geq \sum_{m=1}^{M=4} \sum_{w=1}^{W=3} t_{mn} \cdot d_{wn} \quad w = 1, \dots, W = 3 \quad m = 1, \dots, M = 4 \quad (22)$$

La función objetivo a optimizar es la expresión (22) que particularizada al ejemplo es la expresión. (23)

$$[\text{Min}]\Delta T = \sum_{m=1}^{M=4} C_m \quad (23)$$

La función objetivo definida con la expresión (23) minimiza la variación del tiempo total de operación entre estaciones de trabajo para todas las referencias respecto a la que dispone de un tiempo total de operación más bajo.

Para facilitar la comparativa del uso sólo de un AG con la nueva metodología matricial se plantea como función objetivo minimizar el sumatorio de la desviación típica entre estaciones de trabajo de los totales de tiempo de operación de cada una de las referencias de producto.

De esta forma, la reformulación de función objetivo es la expresión (24), donde twm_{wm} corresponde al tiempo total de las tareas asignadas a la estación de trabajo w respecto la referencia de producto m .

$$[\text{Min}]\Delta T = \text{Min} \left(\frac{\sum_{m=1}^{M=4} \sqrt{\frac{\sum_{w=1}^{W=3} (twm_{wm} - \bar{twm}_{wm})^2}{W}}}{M} \right) \quad (24)$$

4.2.1. Resolución con sólo un AG

El resultado del cromosoma optimizado mediante el AG del solver de Excel se presenta en la expresión 25. Para facilitar su comprensión respecto al ejemplo, se presenta la Tabla 7.

$$chrom_{1,20} = (1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 3 \ 3) \quad (25)$$

Tabla 7. Localización óptima de las tareas de ensamblaje en las estaciones de trabajo

Tarea de ensamblaje (n)	Estación de Trabajo W	Tarea de ensamblaje (n)	Estación de Trabajo W
1) Colocar chasis	1	11) Ensamblar puesta	3
2) Ensamblar ruedas	1	12) Ensamblar cristal	3
3) Cablear chasis	2	13) Ensamblar puerta	3
4) Colocar alfombrillas	3	14) Ensamblar cristal	3
5) Ensamblar bastidor familiar	1	15) Ensamblar aire	2
6) Atornillar bastidor familiar	2	16) Chequear aire	2
7) Ensamblar bastidor furgoneta	2	17) Ensamblar	2
8) Atornillar bastidor furgoneta	2	18) Chequear	2
9) Ensamblar bastidor pick up	2	19) Chequeo general	3
10) Atornillar bastidor pick up	3	20) Embalaje	3

En la Tabla 8 se calculan los tiempos totales de operación para cada una de las estaciones de trabajo para las 4 referencias consideradas al iniciar la industrialización.

Tabla 8. Tiempos totales de operación por referencia de producto de tareas de ensamblaje por estación y agregado.

	$w=1$ [min]	$w=2$ [min]	$w=3$ [min]	Tiempo agregado por referencia [min]
m_1	55	50	60	165
m_2	50	40	47	137
m_3	45	30	35	105
m_4	55	55	60	170

Capítulo 4. Aplicación de la nueva metodología matricial a un ejemplo.

Los valores de la Tabla 8 muestra que para ensamblar la referencia de producto 1, se ha asignado 55 min a la estación de trabajo 1 (tareas 1, 2 y 5), 50 min a la estación de trabajo 2 (tareas 3, 6, 15, 16) y 60 min a la estación de trabajo 3 (tareas 4, 11, 12, 13, 14, 19, 20). Significa que al ensamblar la referencia de producto 1 el tiempo de ciclo de la línea de ensamblaje es igual a 60 min correspondiente al tiempo total de operación de las tareas de ensamblaje asignadas a la estación de trabajo 3, siendo ésta el cuello de botella de la línea de ensamblaje diseñada.

Se observa también que la referencia de producto 4 es la que tiene el tiempo agregado más largo de ensamblaje de todas las estaciones de trabajo y la que se ha utilizado para determinar el número de estaciones de trabajo con el *takt time*. En este ejemplo, al haber diseñado la línea de ensamblaje incluyendo inicialmente la referencia de producto con el tiempo más largo, no habrá problemas en el futuro. En caso contrario, si no se incluye inicialmente la referencia de producto con el tiempo más largo, puede haber dificultades relacionadas con el diseño de la línea de ensamblaje cuando en el futuro se requiera fabricar nuevas referencias con un tiempo agregado mayor, lo que implicaría no poder satisfacer la demanda del cliente con el número de estaciones de trabajo calculadas inicialmente.

4.3.Planteamiento y resolución con un AG y la nueva metodología matricial

Si una pyme quiere implementar la nueva metodología matricial se requiere, como marco organizativo, que tenga implementadas las buenas prácticas correspondientes a la aplicación del *Lean manufacturing*, la ingeniería concurrente y el diseño modular-funcional descritas en el apartado 2.5. No es posible utilizar la metodología matricial propuesta sin haber implantado previamente las citadas buenas prácticas.

4.3.1. Planteamiento con un AG y la nueva metodología matricial

A partir de dicho marco organizativo, el paso 1 de la metodología matricial consiste en la definición de la matriz **A**, que se presenta en la Tabla 9. La matriz **A** inicial tiene 4 filas y 8 columnas. y es la adaptación de la Tabla 2 anterior.

Tabla 9. Matriz A.

Referencia de producto m	Funcionalidades del producto, f							
	Común 1	Chasis Fam. 2	Chasis Furgo. 3	Chasis Pick up 4	Puertas del. 5	Puertas tras. 6	Aire acond. 7	Clima 8
1	1	1	0	0	1	1	1	0
2	1	0	1	0	1	0	1	0
3	1	0	0	1	1	0	0	0
4	1	1	0	0	1	1	0	1

Capítulo 4. Aplicación de la nueva metodología matricial a un ejemplo.

El paso 2 consiste en agrupar los vectores coincidentes e identificar los vectores complementarios de la matriz **A**. En la Tabla 9 se detectan los siguientes vectores coincidentes: la funcionalidad de producto 5 ($f = 5$) es coincidente con la funcionalidad del producto 1 o común ($f = 1$); la funcionalidad de producto 6 ($f = 6$) es coincidente con la funcionalidad del producto 2 ($f = 2$).

De acuerdo con la expresión (2), $k = 2, i = 2, r_1 = 2$ y $r_2 = 2$. La nueva matriz **A** se presenta en la Tabla 10. Para facilitar la comprensión, las funcionalidades del producto que son coincidentes se les denomina como f_j indicando que se han agrupado una o más funcionalidades del producto en una misma funcionalidad. Así, por ejemplo, 1_5 indica que la funcionalidad de producto 1 se ha unido a la funcionalidad de producto 5.

Tabla 10. Nueva matriz **A** después de agrupar vectores coincidentes.

Referencia de producto m	Funcionalidades del producto, f					
	Común + Puertas del. 1_5	Chasis Fam. + Puertas tras. 2_6	Chasis Furgo. 3	Chasis Pick up 4	Aire acond. 7	Clima 8
1	1	1	0	0	1	0
2	1	0	1	0	1	0
3	1	0	0	1	0	0
4	1	1	0	0	0	1

Referente a la identificación de los vectores complementarios, se observa los siguientes casos en la Tabla 10.

Capítulo 4. Aplicación de la nueva metodología matricial a un ejemplo.

Agrupando las funcionalidades del producto 2_6 (previamente agrupada con 6) con 3 y 4, se obtiene la funcionalidad del producto común 1_5 . Este es un hecho muy habitual en líneas de ensamblaje reales. En este ejemplo las funcionalidades 2_6 , 3 y 4 corresponden a ensamblar todos los tipos de chasis disponibles para el catálogo de producto de los vehículos, por eso estas funcionalidades del producto las consideramos complementarias entre sí, respecto a la funcionalidad del producto 1_5 . En la Tabla 11 se ilustra el hecho de detectar esta complementariedad entre 2_6+3+4 respecto a 1_5 eliminando la separación entre estas columnas.

A nivel de fabricación es aconsejable ubicar juntas las tareas de ensamblaje de las funcionalidades del producto complementarias ya que se puede asumir que los medios para ensamblar los distintos tipos de chasis requieren de herramientas muy similares o idénticas, las cuales se ubican en una única estación de trabajo para no duplicar los medios de fabricación requeridos y minimizar las inversiones.

Tabla 11. Nueva matriz A después de identificar los vectores complementarios.

	Funcionalidades del producto, f						
	Funcionalidades complementarias $1_5=2_6+3+4$						
Referencia de producto m	Común + Puertas del. 1_5	Chasis Fam. + Puertas tras. 2_6	Chasis Furgo. 3	Chasis Pick up 4	Aire acond. 7	Clima 8	
1	1	1	0	0	1	0	
2	1	0	1	0	1	0	
3	1	0	0	1	0	0	
4	1	1	0	0	0	1	

Agrupando las funcionalidades del producto 4, 7 y 8 se observa que también se obtiene la funcionalidad de producto común 1. Esta complementariedad es matemáticamente factible, pero aquí es donde el conocimiento de los procesos industriales de la pyme sobre el diseño del producto y sobre la futura línea de ensamblaje, le lleva a decidir sobre si esta complementariedad es aconsejable. Un argumento típico para aceptar o no una complementariedad es evaluar si la ubicación de las herramientas de fabricación y ensamblaje será fija y con el mínimo coste.

En cambio, la anterior complementariedad (funcionalidades del producto 2, 3 y 4 igual a la funcionalidad 1₅), es adecuada al emplearse las mismas herramientas de producción.

Todo ello es un preproceso inicial que descarta complementariedades entre funcionalidades del producto no factibles en términos de producción que matemáticamente el AG podría ofrecer como óptimas. De esta forma, la nueva metodología matricial restringe más las soluciones posibles proporcionadas por el AG a soluciones viables.

En el caso de pymes, este paso se considera abordable manualmente, ya que el número de funcionalidades del producto que son complementarias es manejable.

Finalmente, la matriz **A** queda con 4 filas y 6 columnas como muestra la Tabla 11.

El paso 3 consiste en la definición de la matriz **B** de tareas de montaje agrupadas por las funcionalidades del producto definidas en la matriz final **A**. La matriz **B** se presenta en la Tabla 12, tiene una dimensión de 20 filas y 6 columnas.

Tabla 12. Matriz B.

	Funcionalidades del producto, f						
	Funcionalidades complementarias					Aire acond.	Clima
	$1_5=2_6+3+4$						
Referencia de producto m	Común + Puertas del. 1_5	Chasis Fam. + Puertas tras. 2_6	Chasis Furgo. 3	Chasis Pick up 4	7	8	
1) Colocar chasis	1	0	0	0	0	0	
2) Ensamblar ruedas	1	0	0	0	0	0	
3) Cablear chasis	1	0	0	0	0	0	
4) Colocar alfombrillas	1	0	0	0	0	0	
5) Ensamblar bastidor familiar	0	1	0	0	0	0	
6) Atornillar bastidor familiar	0	1	0	0	0	0	
7) Ensamblar bastidor furgoneta	0	0	1	0	0	0	
8) Atornillar bastidor furgoneta	0	0	1	0	0	0	
9) Ensamblar bastidor pick up	0	0	0	1	0	0	
10) Atornillar bastidor pick up	0	0	0	1	0	0	
11) Ensamblar puerta delantera	1	0	0	0	0	0	
12) Ensamblar cristal delantero	1	0	0	0	0	0	
13) Ensamblar puerta trasera	0	1	0	0	0	0	
14) Ensamblar cristal trasero	0	1	0	0	0	0	
15) Ensamblar aire	0	0	0	0	1	0	
16) Chequear aire	0	0	0	0	1	0	
17) Ensamblar climatizador	0	0	0	0	0	1	
18) Chequear climatizador	0	0	0	0	0	1	
19) Chequeo general	1	0	0	0	0	0	
20) Embalaje	1	0	0	0	0	0	

4.2.2. Resolución con un AG y la nueva metodología matricial

El resultado del cromosoma optimizado de la expresión (25) de la nueva metodología matricial, es exactamente el mismo que el de utilizar sólo un AG. Esto es debido a que la nueva metodología matricial es un preprocesamiento de los datos iniciales, para mejorar la transparencia algorítmica obtenida de los resultados posteriores.

Así la expresión (23) y la Tabla 7 también son válidas para la resolución con un AG y la nueva metodología matricial. De acuerdo con la asignación de tareas de ensamblaje después de ejecutar el AG, se calcula la distribución de los tiempos de operación agregados para cada una de las funcionalidades del producto para cada estación de trabajo. Estos tiempos de operación agregados se han equilibrado de acuerdo con la expresión (25) para minimizar la desviación estándar entre estaciones de trabajo para cada una de las funcionalidades definidas del producto. Los valores obtenidos para el ejemplo son los de la Tabla 13.

Tabla 13. Valor de los vectores d_w .

Tareas de ensamblaje, n	d_w	d_1	d_2	d_3
1) Colocar chasis	d_{w1}	1	0	0
2) Ensamblar ruedas	d_{w2}	1	0	0
3) Cablear chasis	d_{w3}	0	1	0
4) Colocar alfombrillas	d_{w4}	0	0	1
5) Ensamblar bastidor familiar	d_{w5}	1	0	0
6) Atornillar bastidor familiar	d_{w6}	0	1	0
7) Ensamblar bastidor furgoneta	d_{w7}	0	1	0
8) Atornillar bastidor furgoneta	d_{w8}	0	1	0
9) Ensamblar bastidor pick up	d_{w9}	0	1	0
10) Atornillar bastidor pick up	d_{w10}	0	0	1
11) Ensamblar puesta delantera	d_{w11}	0	0	1
12) Ensamblar cristal delantero	d_{w12}	0	0	1
13) Ensamblar puerta trasera	d_{w13}	0	0	1
14) Ensamblar cristal trasero	d_{w14}	0	0	1
15) Ensamblar aire acondicionado	d_{w15}	0	1	0
16) Chequear aire acondicionado	d_{w16}	0	1	0
17) Ensamblar climatizador	d_{w17}	0	1	0
18) Chequear climatizador	d_{w18}	0	1	0
19) Chequeo general	d_{w19}	0	0	1
20) Embalaje	d_{w20}	0	0	1

Con la expresión (15) se obtiene los valores de **TW**. Inicialmente, con la matriz **T** con valores en su diagonal correspondiente a la Tabla 3 y los vectores \mathbf{d}_w que indican la asignación de las tareas de ensamblaje en las estaciones de trabajo, se obtiene el vector \mathbf{tw}_w con la expresión (14) para cada una de las estaciones de trabajo.

Los tiempos de operación de las tareas de ensamblaje de todas las estaciones de trabajo individuales \mathbf{tw}_w se agrupan en la matriz **TW** con la expresión (15). Se presenta en la expresión (26).

$$\mathbf{TW} = \begin{bmatrix} \mathbf{tw}_1 \\ \mathbf{tw}_2 \\ \mathbf{tw}_3 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 20 & 15 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25 & 0 & 0 & 10 & 15 & 7 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 10 & 15 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 10 & 5 & 15 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 5 \end{bmatrix}$$

(26)

Finalmente, con la expresión (16) se obtiene la matriz **TWF**.

$$\mathbf{TWF} = \begin{bmatrix} 35 & 20 & 15 & 10 & 0 & 0 \\ 30 & 10 & 0 & 0 & 10 & 15 \\ 30 & 20 & 7 & 5 & 10 & 10 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Aplicando las complementariedades observadas en el paso 2.2 se obtiene la matriz **TWF'** con la expresión. (17). Aquí es donde se observa la estrategia planteada de minimizar los tiempos de deuda. Por ejemplo, para la estación de trabajo 1 se puede apreciar que los tiempos totales de operación para las funcionalidades del producto 2₆, 3 y 4 son de 20 min, 15 min y 10 min respectivamente. Al ser estas funcionalidades del producto complementarias entre sí respecto a la funcionalidad de producto 1₅, se tiene la posibilidad de agregar el menor tiempo de operación común entre ellas al tiempo de operación de la funcionalidad de producto

1, que es la agregada de las complementarias; en este caso 10 min de la funcionalidad de producto 4 se agregan al tiempo de operación de la funcionalidad de producto 1. El tiempo sobrante para las funcionalidades del producto complementarias con tiempo de operación por encima del mínimo (10 min) son los restos que representan los desequilibrios sistémicos de la modelización matemática propuesta para la línea de ensamblaje. En este caso existe una deuda de 10 min para la funcionalidad del producto 2 y de 5 minutos para la funcionalidad del producto 3. Con esta estrategia se obtiene la matriz final **TWF'**

La expresión (28) y (29) se obtienen de sustituir los valores en la expresión (27)

$$\mathbf{TWF}' = \begin{bmatrix} 35 + \min(20,15,10) & 10 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ & 10 & 0 & 0 & 10 & 15 \\ & 15 & 2 & 0 & 10 & 10 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{TWF}' = \begin{bmatrix} 45 & 10 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 30 & 10 & 0 & 0 & 10 & 15 \\ 35 & 15 & 2 & 0 & 10 & 10 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Para facilitar la comprensión de **TWF'** se realiza la Tabla 14 para ilustrar como se asignan los mínimos de las funcionalidades del producto complementarias que para este ejemplo son 2_6+3+4 respecto a 1_5 . En la última fila se calculan las desviaciones estándar de las funcionalidades del producto complementarias y no complementarias, obtenidas con la expresión (18). Se obtiene un valor de la función objetivo, correspondiente a la minimización del sumatorio de las desviaciones estándar de las funcionalidades del producto de $[\text{Min}]\Delta T = 2,56$ min.

Tabla 14. Explicación del funcionamiento de la matriz TWF'

		Funcionalidades del producto, f								
		Común + Puertas del. 1_5		Chasis fam. + Puertas tras. 2_6		Chasis Furgo. 3		Chasis Pick up 4		Aire acond. 7
w	twf'_{w1}	<i>Min*</i>	twf'_{w2}	twf_{w2}	twf'_{w3}	twf_{w3}	twf'_{w4}	twf_{w4}	twf_{w7}	twf_{w8}
1	45	<i>10</i>	10	20	5	15	0	10	0	0
2	30	<i>0</i>	10	10	0	0	0	0	10	15
3	35	<i>5</i>	15	20	2	7	0	5	10	10
Desviac. estándar por funcional.	6,24		2,36		2,05		0,00		4,71	6,24

* El tiempo mínimo entre las funcionalidades del producto 2, 3 y 4 se ha agregado a la funcionalidad común del producto.

La columna en rojo indica los tiempos de operación mínimos entre las funcionalidades del producto 2₅, 3 y 4 de las columnas azules. Las columnas en azul indican vectores complementarios con otros vectores y cada valor corresponde al total de los tiempos de ensamblaje de una funcionalidad asignada a cada estación de trabajo por el AG. Por ejemplo, para la estación de trabajo 1, los valores en azul twf_{w2} , twf_{w3} and twf_{w4} son 20 min (tarea 5), 15 min (tarea 7) y 10 min (tarea 15 o 16 porque tienen el mismo tiempo). Como el valor mínimo es 10 min, a la funcionalidad complementaria 1 que tenía un tiempo de 35 min asignado para la estación de trabajo 1 (tareas 1 y 2), el tiempo total asignado para equilibrar la funcionalidad del producto 1 de la línea de ensamblaje es de 45 min, valor twf'_{11} de la matriz TWF'. El tiempo mínimo restado de 10 min, se resta a las columnas en azul twf_{w2} , twf_{w3} y twf_{w4} , dando

lugar a las columnas negras twf'_{w2} , twf'_{w3} y twf'_{w4} . Estas columnas de funcionalidades complementarias twf'_{wf} ilustran las deudas de tiempo de estas funcionalidades del producto, que representan el origen de los desequilibrios en la línea de ensamblaje que, de esta forma, se pueden analizar fácilmente. En el punto 4.4 se explica cómo ayudan a mejorar la transparencia algorítmica, objetivo principal de la nueva metodología matricial. También permite prever los desequilibrios generados por futuras modificaciones, facilitando así su planificación y evitando costosas reorganizaciones de la línea de ensamblaje.

La nueva metodología matricial, una vez resuelto el problema con el AG, sirve para mejorar la transparencia algorítmica.

4.4. Ventajas aportadas del uso de un AG con la nueva metodología matricial

En este apartado, una vez resuelto el mismo problema del apartado 4.1 con un AG y con un AG conjuntamente con el preprocesado y postprocesado propuesto con la nueva metodología matricial, se comparan la transparencia algorítmica conseguida y otros aspectos.

4.4.1. Transparencia algorítmica para analizar futuras modificaciones de la línea de ensamblaje.

Una vez se ha diseñado e implementado la línea de ensamblaje para un catálogo de productos es muy habitual, en entornos industriales, la necesidad de afrontar modificaciones y tener que volver a analizar el estado en cuanto al equilibrado de la línea de ensamblaje. Ejemplos de futuras modificaciones que ocurren son modificaciones de las herramientas de fabricación, de los tiempos de operación o implementación de nuevas tareas de ensamblaje para implementar una o varias nuevas funcionalidades del producto.

Partiendo del ejemplo de la sección 4.1, se plantea implementar una modificación de la funcionalidad del producto 7 (aire acondicionado) que implica una tarea de ensamblaje

adicional con un tiempo de operación de $t_{21} = 5$ min, que no modifica las restricciones de precedencia de la Figura 15. Implementar esta modificación significa una nueva fila en la Tabla 3 y una nueva columna en la Tabla 4.

El objetivo es saber cuál de las 3 estaciones de trabajo es la mejor para asumir esta nueva tarea de ensamblaje y su tiempo de operación. Las posibles alternativas se pueden analizar en la Tabla 14.

Tabla 15. Efectos alternativos de agregar una nueva tarea de ensamblaje a la funcionalidad del producto 7.

	Aire acond. 7	Aire acond. 7 (t_{21} en $w = 1$)	Aire acond. 7 (t_{21} en $w = 2$)	Aire acond. 7 (t_{21} en $w = 3$)
w	twf_{w7}	twf_{w7}	twf_{w7}	twf_{w7}
1	0	5	0	0
2	10	10	15	10
3	10	10	10	15
Desviación estándar	4,71	2,35	6,23	6,23

El análisis de la Tabla 15 permite ver que la mejor opción para equilibrar la línea de ensamblaje diseñada para todas las referencias de producto es la estación de trabajo $w=1$, ya que provoca el valor de desviación estándar más bajo para el valor de la función objetivo, siendo la alternativa donde el sistema queda más equilibrado. Estas alternativas deben compararse con la columna twf_{w7} de Tabla 14, que para facilitar la comprensión se agrega a la primera columna de la Tabla 15. Esta optimización es válida para cualquier combinación de

funcionalidades del producto, es decir, para todas las referencias de productos presentes y futuras que cumplan las restricciones establecidas.

Sin embargo, sin la nueva metodología matricial, esta misma decisión implicaría un recálculo de todo el sistema, que modificaría la disposición de los medios de fabricación o, como segunda alternativa, asumir los desequilibrios que estas modificaciones supongan tomando únicamente soluciones paliativas. Ambas soluciones pueden tener un elevado coste económico, ya sea de inversión o de costes directos respectivamente.

La Tabla 8 (caso solo AG) muestra los desequilibrios para cada una de las referencias m , pero no aporta ninguna información adicional que permita posicionar esta nueva tarea de ensamblaje y ver sus efectos en la línea de ensamblaje optimizada, ni el análisis posterior de cara a afrontar modificaciones o la industrialización de nuevas referencias de producto

4.4.2. Transparencia algorítmica mejorada para la detección de los desequilibrios sistémicos de la línea de ensamblaje.

Con el uso de un AG conjuntamente con la nueva metodología matricial, los desequilibrios sistémicos presentes en la nueva línea de ensamblaje se pueden detectar con la información de la Tabla 14. Las columnas en azul son las deudas de tiempo por funcionalidad del producto, en cada una de las estaciones de trabajo. Son los desequilibrios sistémicos, indicando donde se tienen que llevar a cabo acciones de mejora desde un punto de vista de la fabricación. La reducción de cada una de estas deudas permite un mejor equilibrado de la línea de ensamblaje para todo el catálogo de productos.

Por ejemplo, en la Tabla 14, la columna twf'_{w4} tiene una desviación estándar es 0. Esto indica que la funcionalidad del producto 4 no precisa ser modificada desde el punto de vista de la fabricación, ya que no provoca un desequilibrio en la línea de ensamblaje para cualquiera de las referencias de productos. Por lo tanto, la asignación de las tareas de ensamblaje 9 y 10 a la

estación de trabajo 1 ($t_9 = 10$ min, $t_{10} = 5$ min) es adecuada para todo el catálogo de productos.

La columna twf'_{w8} , presenta una desviación estándar de 6,24 min, que indica como se ha repartido el tiempo de las tareas de trabajo entre las estaciones 1, 2 y 3. Esto significa, que esta funcionalidad del producto tiene oportunidades de mejora desde el punto de vista de la fabricación. Sin embargo, acciones que se pueden llevar a cabo consisten en mejorar las herramientas para minimizar los tiempos de operación o dividir las tareas de ensamblaje 17 y 18 si fuera posible, reasignando las nuevas tareas de ensamblaje del diseño modular-funcional de la Tabla 14. Si se consigue esta mejora, se permite conseguir soluciones mejores en cuanto al equilibrado de la línea de ensamblaje por parte de un algoritmo de optimización, como un AG.

Sin la nueva metodología matricial, esta misma situación ha de ser resuelta sin ninguna guía, por lo que no se puede priorizar las oportunidades de mejora ni detectar las más relevantes para la mejora del proceso. De esta forma se pierde cualquier posibilidad de llevar a cabo ninguna estrategia para la optimización del proceso de fabricación.

4.4.3. Nuevas referencias de producto equilibradas por defecto

Si debido a la demanda del mercado, se requiere implementar nuevas referencias de producto en la línea de ensamblaje, por ejemplo un nueva referencia que correspondiera a montar la referencia de producto 2 con climatizador en lugar de aire acondicionado, si esta nueva referencia de producto ($m=5$) cumple con las condiciones de vectores coincidentes y vectores complementarios definidas con el paso 2 de la metodología, el equilibrado de la línea de ensamblaje es válido también para esta nueva referencia de producto.

La Tabla 16 presenta la nueva referencia de producto $m = 5$, definida mediante las siguientes funcionalidades del producto.

Tabla 16. Nueva referencia de producto a fabricar la línea de ensamblaje.

		<i>Funcionalidades del producto, f</i>							
		Chasis	Chasis	Chasis	Puerta	Puertas	Aire		
		Común	Fam.	Furgo.	Pick up	s del.	tras.	acon	Clima
<i>m</i>		1	2	3	4	5	6	7	8
5	1	0	1	0	1	1	0	1	

Esta nueva referencia de producto $m=5$ no modifica los resultados de la Tabla 14. Agregar nuevas referencias de producto no obliga a reequilibrar la línea de ensamblaje, siempre y cuando las nuevas referencias cumplan con las condiciones de vectores coincidentes y vectores complementarios establecidas previamente. Esto produce una ventaja en cuanto al estudio de los costes y tiempos de industrializar las nuevas referencias de producto que se vayan añadiendo, siendo una situación muy habitual para las pymes del sector metal, donde se pueden requerir nuevas referencias de productos por iniciativas de marketing y no es posible rediseñar la línea de ensamblaje ya implementada en la planta productiva.

En la Tabla 17 se muestran los resultados de aplicar el modelado obtenido en la Tabla 14 a las referencias de producto 1, 2, 3, 4 y a la nueva referencia de producto 5 que se ha incorporado a la línea de ensamblaje. Se puede observar que, gracias al equilibrado por funcionalidad de producto a través de la nueva metodología matricial propuesta, la nueva

referencia de producto se equilibra automáticamente, ya que cumple las condiciones del método de vectores coincidentes y complementarios.

Tabla 17. Tiempos de estación de trabajo (min) por referencia de producto después de agregar una nueva.

	w=1	w=2	w=3
	[min]	[min]	[min]
Referencia 1	55	50	60
Referencia 2	50	40	47
Referencia 3	45	30	35
Referencia 4	55	55	60
Referencia 5	50	45	47

Con sólo un AG, la inclusión de una nueva referencia de producto suele implicar volver a resolver el problema, que puede dar lugar a una segunda solución diferente de la inicial, que es a partir de la cual se ha implementado la línea de ensamblaje actual en la distribución de la planta. Entonces puede ser que esta nueva segunda solución óptima pueda ser no factible de implementar, debido al coste que implica modificar las estaciones de trabajo para la nueva configuración de la línea de ensamblaje.

4.4.4. Resolución automatizada y rápida

El ejemplo planteado, se ha resuelto con un número mayor de referencias de producto y funcionalidades del producto para ambos métodos para comparar su coste computacional en tiempo de resolución del problema.

Capítulo 4. Aplicación de la nueva metodología matricial a un ejemplo.

Se han comparado 12 situaciones con diferentes valores de M y de F que se presentan en la Tabla 18. Se han escogido estas dimensiones porque la tendencia actual del mercado es diseñar catálogos de productos con un gran número de referencias, debido a la tendencia de personalización de los productos.

Tabla 18. Dimensiones M y F de los ejemplos evaluados.

<i>Ejemplo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>9</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
<i>M</i>	20	200	1200	20	200	1200	20	200	1200
<i>F</i>	9	9	9	18	18	18	36	36	36

El AG se ha ejecutado en una computadora personal con 4 núcleos de CPU y un reloj base de 2,1 GHz, requiriendo un tiempo promedio de 84 s, con 12.400 iteraciones promedio utilizando las herramientas evolutivas del *solver* y el método basado en la población de Microsoft Excel, con un tamaño de población de 100, una tasa de convergencia de 0,0001, una tasa de mutación de 0,075 y una tasa de cruce con los valores estándar. La condición de parada de las iteraciones se fija en conseguir un valor $[Min]\Delta T = 0,85$ min para las respectivas funciones objetivos. En la Figura 16 se presenta el coste computacional para los distintos ejemplos.

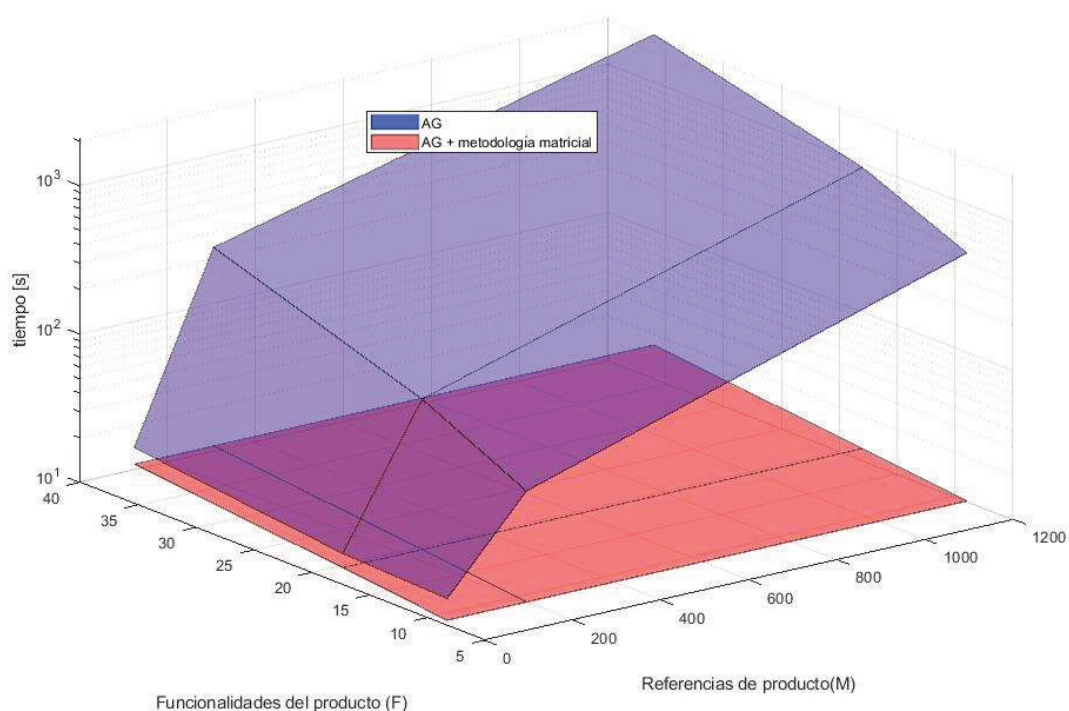


Fig. 16. Gráfico computacional comparativo con el algoritmo genético estándar

El número de iteraciones de AG necesarias para encontrar la solución con ambas metodologías es similar, sin embargo, el tiempo por iteración mediante el AG combinado con la nueva metodología propuesta es visiblemente menor y crece con el número de funcionalidades del producto F del modelo: cuantas más funcionalidades más tiempo. Aplicando solo un AG, el tiempo de ciclo de resolución crece en función del número de referencias de producto M .

Este hecho es relevante porque se debe tener en cuenta que, en entornos industriales reales, el número de referencias de producto M es consecuencia de la combinación de las funcionalidades del producto presentes en el catálogo de productos, por lo que el número máximo teórico de referencias de producto M es mayor que el número de funcionalidades del producto F . Esto se ve reflejado en coste computacional por iteración.

Capítulo 4. Aplicación de la nueva metodología matricial a un ejemplo.

La Figura 16 muestra como con la nueva metodología matricial el coste computacional crece mucho menos que con el uso de sólo un AG, al aumentar las referencias de producto y las funcionalidades del producto.

Finalmente se presenta la Tabla 19 que resume las características principales para los dos métodos analizados en el ejemplo (AG, y AG con metodología matricial) y lo compara con un tercer método que es el más habitual para las pymes, según la encuesta realizada: el equilibrado de líneas sin el uso de algoritmos de optimización basado en la experiencia previa.

El estado actual de las pymes, en cuanto al equilibrado de líneas de ensamblaje, según la encuesta realizada corresponde a la utilización mayoritaria de la metodología de equilibrado sin algoritmos de optimización, que no permiten obtener ninguna transparencia algorítmica y, además, requiere de un largo estudio iterativo por parte del ingeniero de procesos.

La citada falta de transparencia algorítmica también es característica en la aplicación de un AG y la carencia de las herramientas informáticas por parte de las pymes son motivos para la no generalización de los AG en las pymes.

Por el contrario, como se indica en la Tabla 19, mediante la nueva metodología matricial propuesta, ejecutada mediante hojas de cálculo, se logra una mayor transparencia algorítmica que mejora la usabilidad de la solución obtenida mediante el AG.

Tabla 19. Comparación de los métodos de equilibrio encontrados en las pymes.

Soporte	Característica	Ventaja	Productividad Mano de Obra Directa	Productividad Mano de Obra Indirecta	Flexibilidad	Metodología		
						Equilibrado sin algoritmos de optimización	AG	AG + Metodología matricial
Algoritmo Genético	Resolución automatizada y rápida	-	+	+	no	sí	sí	
Transparencia Algorítmica	Transparencia mejorada para analizar futuras modificaciones	-	+	+	no	no	sí	
	Transparencia mejorada para el diagnóstico intuitivo de los desequilibrios sistémicos.	+	+	+	no	no	sí	
Modelización Matricial	Nuevas referencias de productos equilibrados por defecto *	+	+	+	no	no	sí	

* Las nuevas referencias deben ser compatibles con la matriz A previamente definida.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES, PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS Y CONTRIBUCIONES

Con el objetivo de aumentar entre las pymes el uso de algoritmos genéticos para el equilibrio de la línea de montaje, esta tesis propone una nueva metodología matricial para mejorar la transparencia algorítmica al equilibrar líneas de montaje que se pueden clasificar como problemas MMALB tipo 2, en contraste con la transparencia algorítmica obtenida usando un AG. El nivel de transparencia algorítmica lograda actualmente con el uso de un AG independiente podría ser una barrera crucial para su uso por los ingenieros de procesos de las pymes.

En la revisión del estado del arte sobre el problema ALB realizada, se ha encontrado poca literatura científica centrada en mejorar la transparencia algorítmica. Los trabajos de Montavon et al. (2017) y de Boz et al. (2002) abordan la transparencia algorítmica pero en el ámbito de los algoritmos del *Deep learning*, que se encuentran en una etapa de desarrollo muy alejada en comparación a como abordan actualmente las pymes el problema ALB.

La mayoría de los trabajos en la bibliografía se centran en aumentar la complejidad de los modelos matemáticos o reducir los tiempos de cálculo, pero esto aleja aún más estos trabajos de su posible implementación en pymes. Esta conclusión contribuye a la idea propuesta por Eghtesadifard et al. (2020), que ha realizado una revisión exhaustiva de los artículos publicados sobre ALB y reclama más estudios de casos reales sobre la implementación de estas metodologías de optimización.

La metodología expuesta consiste, básicamente, en 5 pasos que requieren de una preparación previa de los datos iniciales de un problema MMALB tipo 2, que permiten una agrupación final de los datos obtenidos por el AG mejorando la transparencia algorítmica de los resultados. Una de las novedades de la metodología es el enfoque de agrupar los resultados finales por funcionalidades de producto en lugar de por referencias de producto que es el

enfoque habitual cuando se usa un AG. Esta agrupación por funcionalidades del producto, conjuntamente con el uso del preprocesado manual propuesto mediante la agrupación de vectores coincidentes y la identificación de vectores complementarios, ayudan a la reducción del coste computacional del tiempo de cálculo, que es otra aportación de la tesis respecto el uso de un AG. La reducción en el costo computacional, que es más importante cuanto mayor es el número de referencias de productos, hace que la metodología sea eficiente, no solo para las pymes sino también para empresas más grandes.

El marco de validez expuesto, indispensable para que una pyme pueda implementar la nueva metodología matricial, comprende aplicar los principios básicos descritos del *Lean Manufacturing*, ingeniería concurrente y diseño modular-funcional.

La mejora de transparencia algorítmica se demuestra en un ejemplo paradigmático basado en la industria, para mostrar claramente cómo el AG podría implementarse ampliamente como una herramienta sencilla para equilibrar líneas de montaje para PYMES.

Como consecuencia de aplicar en el ejemplo la nueva metodología matricial junto con el uso de un AG, la transparencia de los resultados mejoran de la siguiente manera: las oportunidades para la mejora del montaje línea diseñada se muestran claramente; ofrece un diagnóstico intuitivo de desequilibrios sistémicos como consecuencia de colocar las tareas de montaje en ciertas estaciones de trabajo; no hay necesidad de ajustar el conjunto diseñado líneas al agregar nuevas referencias de producto, ya que quedan inmediatamente equilibradas si las referencias de nuevos productos cumplen las condiciones de coincidencia y vectores complementarios.

Otra ventaja adicional expuesta en el ejemplo paradigmático es que la nueva metodología propuesta utilizando el GA es incluso aplicable a través de hojas de cálculo, que son muy utilizadas entre pymes. Además, también se demuestra una reducción en el costo computacional, que cobra mayor importancia a medida que aumenta el número de referencias

de productos aumenta, por lo que la metodología no sólo es adecuada para pymes, sino también incluso para empresas más grandes.

Como futuras investigaciones, se propone realizar un análisis preciso en términos del equilibrado logrado entre estaciones de trabajo y la transparencia algorítmica alcanzada en un caso real. Otros estudios implicarían aplicar la nueva metodología a otros tipos de problemas ALB, como líneas paralelas, de dos caras y configuraciones de línea U o, adicionalmente, estudiar el uso de la nueva metodología matricial conjuntamente con otros algoritmos de optimización diferentes al AG.

Los principales resultados de esta tesis se han difundido en el siguiente artículo, presentado en una revista indexada:

Anel, J. I., Català, P., Serra, M., & Domenech, B. (2022). New Matrix Methodology for Algorithmic Transparency in Assembly Line Balancing Using a Genetic Algorithm. *Operations Research Perspectives*, 9, 100223.
<https://doi.org/10.1016/J.ORP.2022.100223>

ANEXO 1: ARCHIVO EXCEL SIMPLIFICADO PARA TESTEO

Se ha confeccionado un archivo de hoja de cálculo simplificado, donde se ha implementado el ejemplo paradigmático incluido en este trabajo y se han incluido aclaraciones e indicaciones para facilitar su comprensión:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1SDrDA3HtTFENY7nookD10tBcmeB8Zd5d/edit?usp=sharing&ouid=116636763193286027532&rtpof=true&sd=true>

Una vez abierto el vínculo anterior, se recomienda descargar el archivo para ejecutarlo localmente con Microsoft Excel. Para ello es necesario esta sucesión de comandos en la ventana de previsualización de Google drive:

Archivo-Descargar y elegir formato xls de Excel.

A	B	C	D	E	F	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1								Common F1			Family Chassis F2		Van Chassis		Pick up Chassis	Air cond.	Clima	
2								+ Front Doors F5			+ Rear Doors F6		Function3		Function4	Function7	Functionf	
3	Idop	w	Prec1	Prec2	Prec3	Assembly task	tn											
4	1	1	1	0	0	Position chassis	20	1										
5	2	3	1	0	0	Assembly wheels	15	3										
6	3	3	1	0	0	Wire chassis	25	3										
7	4	3	1	0	0	Place mats	5	3										
8	5	3	2	0	0	Mount fam. chassis	20				3							
9	6	3	5	0	0	Screw fam. chassis	10				3							
10	7	3	2	0	0	Mount Van chassis	15						3					
11	8	3	7	0	0	Screw Van chassis	7						3					
12	9	3	2	0	0	Assembly Pickup chassis	10								3			
13	10	3	9	0	0	Screw Pickup chassis	5								3			
14	11	3	6	0	0	Assemble Front Door	10	3										
15	12	3	11	0	0	Front windows	5	3										
16	13	3	6	8	10	Assemble Rear Doors	15				3							
17	14	3	13	0	0	Rear windows	5				3							
18	15	3	3	0	0	Fit air conditioning.	10										3	
19	16	3	15	0	0	Check A A	10										3	
20	17	3	3	0	0	Fit clima	15											3
21	18	3	17	0	0	Check clima	10											3
22	19	3	4	12	14	Basic Check	10	3										
23	20	3	16	18	19	Packing	5	3										
24										Min1								
25						W1	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26						W2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27						W3	90	15	35	50	7	22	0	15	20	25		
28						STD Dev.	38,59		16,50		3,30		0,00		9,43	11,79		
29						STD Dev'	38,59		16,50		3,30		0,00		9,43	11,79		
30						13,27												
31						VARIABLE FITNESS												
32																		

Fig. 17 Archivo Excel del ejemplo paradigmático

Una vez descargado, abierto y habilitado las macros en el archivo de la Figura 17, se ha de instalar el complemento *solver*. Para ello se ha de activar en la siguiente sucesión de comandos en Excel:

Excel-Archivo-Opciones-Complementos-Complementos de Excel (Ir)-Solver y activar.

Una vez instalado el complemento, para ejecutar el algoritmo, se ha de ejecutar la siguiente sucesión de comandos:

Datos-Solver y pulsar Resolver.

Fig. 18. Ventana de parámetros de solver

Como se puede observar en la Figura 18, la función objetivo, cromosoma y algunas restricciones adicionales, necesarias para el buen funcionamiento, están preestablecidas para el ejemplo en esta pantalla de ejecución.

En la Figura 19 se muestra la pantalla de final de iteración. Dicha finalización puede ser configurada por tiempo sin mejorar la solución o activada a petición del usuario.

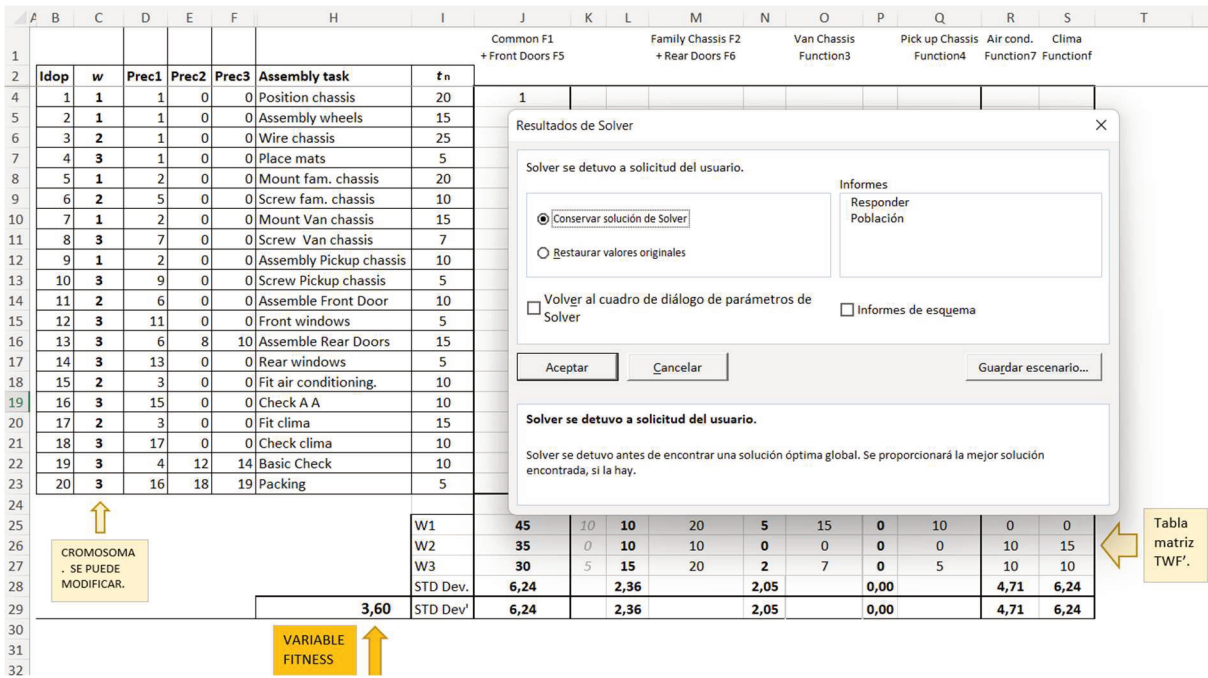


Fig. 19. Archivo Excel tras la resolución.

Bibliografia

- Abdeljaouad, M. A., & Klement, N. (2021). Tabu Search Algorithm for Single and Multi-model Line Balancing Problems. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 630 IFIP, 409–415. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85874-2_43
- Akpınar, Ş., & Baykasoğlu, A. (2014). Modeling and solving mixed-model assembly line balancing problem with setups. Part II: A multiple colony hybrid bees algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 445–461. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.04.001>
<https://doi.org/10.1016/J.ORP.2022.100223>
- Barathwaj, N., Raja, P., & Gokulraj, S. (2015). Optimization of assembly line balancing using genetic algorithm. *Journal of Central South University*, 22(10), 3957–3969. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2940-9>
- Baybars, İ. (1986). A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.8.909>
- Becker, C., & Scholl, A. (2006). 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>
- Boz, O. (2002). Extracting decision trees from trained neural networks. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 32(April 1998), 456–461. <https://doi.org/10.1145/775107.775113>
- Chiang, W. (1998). The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem. *Annals of Operations Research*, 77, 209–227. <https://doi.org/10.1023/A:1018925411397>
- Çil, Z. A., Li, Z., Mete, S., & Özceylan, E. (2020). Mathematical model and bee algorithms for

- mixed-model assembly line balancing problem with physical human–robot collaboration. *Applied Soft Computing Journal*, 93, 106394. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106394>
- Cochran, D. S., Hendricks, S., Barnes, J., & Bi, Z. (2016). Extension of Manufacturing System Design Decomposition to Implement Manufacturing Systems That are Sustainable. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(10), 101006. <https://doi.org/10.1115/1.4034303>
- Dar-El, E. M. (1978). Mixed-model assembly line sequencing problems. *Omega*, 6(4), 313–323. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(78\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0305-0483(78)90004-X)
- Dinler, Derya, Tural, Mustafa Kemal (2021). Exact solution approaches for the workload smoothing in assembly lines. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(6), 1318–1328. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.03.013>
- Eghtesadifard, M., Khalifeh, M., & Khorram, M. (2020). A systematic review of research themes and hot topics in assembly line balancing through the web of science within 1990–2017. *Computers and Industrial Engineering*, 139(February 2019), 106182. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106182>
- Esmailian, G. R., Sulaiman, S., Ismail, N., Hamed, M., & Ahmad, M. M. H. M. (2011). A tabu search approach for mixed-model parallel assembly line balancing problem (type II). *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 8(4), 407–431. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2011.041803>
- Fattahi, P., & Salehi, M. (2020). *Sequencing the mixed-model assembly line to minimize the total utility and idle costs with variable launching interval*. 2009, 987–998. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2020-0>
- Gonçalves, M. T., & Salonitis, K. (2017). Lean Assessment Tool for Workstation Design of Assembly Lines. *Procedia CIRP*. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.002>
- Hazır, Ö., Agi, M. A. N., & Guérin, J. (2021). An efficient branch and bound algorithm for

- smoothing the workloads on simple assembly lines. *International Journal of Production Research*, 59(2), 617–634. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1701208>
- Kamal, M., & Martinez Lastr, J. L. (2011). Assembly Line Balancing and Sequencing. In *Assembly Line - Theory and Practice*. <https://doi.org/10.5772/19953>
- Kilbridge, M. D., & Wester, L. (1961). The Balance Delay Problem. *Management Science*, 8(1), 69–84. <https://doi.org/10.1287/mnsc.8.1.69>
- Kilbridge, M. D., & Wester, L. (1962). A Review of Analytical Systems of Line Balancing. *Operations Research*, 10(5), 626–638. <https://doi.org/10.1287/opre.10.5.626>
- Kilinci, O. (2010). A Petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2082-z>
- Kucukkoc, I., & Zhang, D. Z. (2016). Mixed-model parallel two-sided assembly line balancing problem: A flexible agent-based ant colony optimization approach. *Computers and Industrial Engineering*, 97, 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.001>
- Lam, N. T., Toi, L. M., Tuyen, V. T. T., & Hien, D. N. (2016). Lean Line Balancing for an Electronics Assembly Line. *Procedia CIRP*. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.089>
- Liu, X., Yang, X., & Lei, M. (2021). Optimisation of mixed-model assembly line balancing problem under uncertain demand. *Journal of Manufacturing Systems*, 59(September 2020), 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.019>
- Mamun, A. A., Khaled, A. A., Ali, S. M., & Chowdhury, M. M. (2012). A heuristic approach for balancing mixed-model assembly line of type i using genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5106–5116. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.643830>
- MathWorks. (n.d.). *Algoritmo genético en Matlab*. <https://es.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm.html>

- Michels, A. S., Lopes, T. C., & Magatão, L. (2020). An exact method with decomposition techniques and combinatorial Benders' cuts for the type-2 multi-manned assembly line balancing problem. *Operations Research Perspectives*, 7(September), 100163. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2020.100163>
- Montavon, G., Lapuschkin, S., Binder, A., Samek, W., & Müller, K. R. (2017). Explaining nonlinear classification decisions with deep Taylor decomposition. *Pattern Recognition*, 65(August 2016), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.11.008>
- Movsesyan, E., Anokhina, M. (2020). Tesla Vertical Integration Strategies: Theory, Practice, Results. *Business Strategies*, 8, 184-188. <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2020-7-184-188>
- MTM, A. E. de. (n.d.). *Asociación española MTM*. Asociación Española de MTM. <https://www.asocmtm.es/>
- Nazari, A., Thiruvady, D., Elmi, A., & Schneider, J. G. (2020). Simulated Annealing for Single and Mixed Model Assembly Line Balancing with Setups. *2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2020*, 2762–2769. <https://doi.org/10.1109/SSCI47803.2020.9308143>
- Olhede, S. C., & Wolfe, P. J. (2018). The future of statistics and data science. *Statistics and Probability Letters*, 136, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.spl.2018.02.042>
- Pil, F. K., & Holweg, M. (2004). Linking product variety to order-fulfillment strategies. In *Interfaces*. <https://doi.org/10.1287/inte.1040.0092>
- Pınarbasi, M., Alakas, H. M., & Yuzukirmizi, M. (2019). A constraint programming approach to type-2 assembly line balancing problem with assignment restrictions. *Assembly Automation*, 39(5), 813–826. <https://doi.org/10.1108/AA-12-2018-0262>
- Pınarbaşı, M., & Alakaş, H. M. (2020). Balancing stochastic type-II assembly lines: chance-constrained mixed integer and constraint programming models. *Engineering Optimization*,

0273. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2020.1716746>
- Rabbani, M., Mousavi, Z., & Farrokhi-Asl, H. (2016). Multi-objective metaheuristics for solving a type II robotic mixed-model assembly line balancing problem. *Journal of Industrial and Production Engineering*. <https://doi.org/10.1080/21681015.2015.1126656>
- Ramezani, R., & Ezzatpanah, A. (2015). Modeling and solving multi-objective mixed-model assembly line balancing and worker assignment problem. *Computers and Industrial Engineering*, 87, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.04.017>
- Roshani, A., & Giglio, D. (2015). A simulated annealing approach for multi-manned assembly line balancing problem type II. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 2299–2304. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.430>
- Sabuncuoglu, I., Erel, E., & Tanyer, M. (2000). Assembly line balancing using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(3), 295–310. <https://doi.org/10.1023/A:1008923410076>
- Santos, Z. G. dos, Vieira, L., & Balbinotti, G. (2015). Lean Manufacturing and Ergonomic Working Conditions in the Automotive Industry. *Procedia Manufacturing*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.687>
- Simaria, A. S., & Vilarinho, P. M. (2004). A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. *Computers and Industrial Engineering*, 47(4), 391–407. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2004.09.001>
- Sime, H., Jana, P., & Panghal, D. (2019). Feasibility of Using Simulation Technique for Line Balancing In Apparel Industry. *Procedia Manufacturing*, 30, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.043>
- Sivasankaran, P., & Shahabudeen, P. M. (2016). Heuristics for Mixed Model Assembly Line Balancing Problem with Sequencing. *Intelligent Information Management*, 8, 41–65. <https://doi.org/10.4236/iim.2016.83005>

- Su, P., & Lu, Y. (2007). Combining genetic algorithm and simulation for the mixed-model assembly line balancing problem. *Proceedings - Third International Conference on Natural Computation, ICNC 2007*. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2007.306>
- Su, P., Wu, N., & Yu, Z. (2014). A Petri net-based heuristic for mixed-model assembly line balancing problem of Type-E. *International Journal of Production Research*, 52(5), 1542–1556. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.849010>
- Tasan, S. Ö., & Tunali, S. (2006). Improving the genetic algorithms performance in simple assembly line balancing. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3984 LNCS, 78–87. https://doi.org/10.1007/11751649_9
- Vilarinho, P. M., & Simaria, A. S. (2006). ANTBAL: An ant colony optimization algorithm for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 44(2), 291–303. <https://doi.org/10.1080/00207540500227612>
- Wang, Y., & Yang, O. (2017). Research on Industrial Assembly Line Balancing Optimization Based on Genetic Algorithm and Witness Simulation. *International Journal of Simulation Modelling*, 16(2), 334–342. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM16\(2\)CO8](https://doi.org/10.2507/IJSIMM16(2)CO8)
- Wei, N. C., & Chao, I. M. (2011). A solution procedure for type e simple assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 61(3), 824–830. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.05.015>
- Yagmahan, B. (2011). Mixed-model assembly line balancing using a multi-objective ant colony optimization approach. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12453–12461. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.026>
- Yan, H. Sen, Jiang, T. H., & Xiong, F. L. (2014). A hybrid electromagnetism-like algorithm for a mixed-model assembly line sequencing problem. *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice*, 21(3), 153–167.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2014.894257>

Zamzam, N., & Elakkad, A. (2021). Time and space multi-manned assembly line balancing problem using genetic algorithm. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(4), 733. <https://doi.org/10.3926/jiem.3542>

Zhao, X., Hsu, C. Y., Chang, P. C., & Li, L. (2016). A genetic algorithm for the multi-objective optimization of mixed-model assembly line based on the mental workload. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 47, 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.03.005>

Zupan, H., & Herakovic, N. (2015). Production line balancing with discrete event simulation: A case study. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 2305–2311. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.431>