

## Problemas de scheduling flow shop en entornos Industria 4.0 bajo un enfoque de lean manufacturing: Una revisión de la literatura

Adrián Toncovich<sup>1</sup>[0000-0002-1841-8726], Daniel Rossit<sup>1,2</sup>[1111-2222-3333-4444] y  
Fernanda Villarreal<sup>3</sup>[0000-0001-7731-5981]

<sup>1</sup> Depto. de Ingeniería, Universidad Nac. del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina.

<sup>2</sup> INMABB-UNS-CONICET, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina.

<sup>3</sup> Depto. de Matemática, Universidad Nac. del Sur, Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina.

atoncovi@uns.edu.ar, daniel.rossit@uns.edu.ar,

fvillarreal@uns.edu.ar

**Resumen.** Este trabajo presenta una revisión de la literatura relacionada con la secuenciación de la producción en configuraciones *flow shop*, en el contexto de la Industria 4.0, con un enfoque en los principios de *lean manufacturing* (LM) y *just-in-time* (JIT). Se analizan los objetivos clave relacionados con el nivelado de la producción (*heijunka*) y la optimización del *makespan*, considerando la evolución hacia entornos de fabricación más automatizados y digitalizados.

En el análisis se destaca la importancia de adaptar las estrategias de secuenciación de la producción para aprovechar al máximo las tecnologías emergentes asociadas con la Industria 4.0 y diseñar una estrategia integral que combine los principios tradicionales de JIT y LM con las oportunidades ofrecidas por la Industria 4.0. Se infiere que existe una necesidad de colaboración estrecha entre profesionales de distintas áreas para diseñar sistemas de secuenciación de la producción que sean flexibles, adaptables y orientados a la mejora de la eficiencia en entornos de negocios que se encuentran en constante evolución.

En particular, se destaca la importancia de conseguir un consumo balanceado de componentes y materias primas que permita conseguir un flujo de materiales más uniforme, de acuerdo con lo que se propugna en las metodologías LM, sin necesidad de mover grandes volúmenes de piezas únicas, generando almacenamientos intermedios temporales.

Estas temáticas de secuenciación considerando el manejo de materiales en entornos de producción Industria 4.0 han sido muy poco estudiadas, observándose que los primeros trabajos son de reciente data. Más aún, si se consideran problemas de *scheduling* en configuraciones productivas del tipo *flow shop*, los casos escasean aún más en la literatura. Lo anterior evidencia una brecha de investigación, que plantea la posibilidad de generar contribuciones futuras para mejorar el entendimiento de estos problemas.

**Palabras clave:** Secuenciación, Flow shop, Just-in-time, Lean Manufacturing, Heijunka, Industria 4.0, Makespan, Nivelación de la Producción.

## 1 Introducción

En la búsqueda continua de eficiencia y competitividad, las empresas modernas están recurriendo cada vez más a enfoques innovadores para optimizar sus procesos de producción. En este contexto, la secuenciación de la producción en entornos *flow shop* emerge como problema clave, especialmente cuando se integra con el enfoque JIT y las tecnologías de la Industria 4.0. Este trabajo está enfocado en la planificación y secuenciación en entornos *flow shop*, explorando cómo la combinación de un enfoque JIT y la aplicación inteligente de tecnologías de la Industria 4.0 puede mejorar la manera en que se gestionan los procesos de producción, no solo en cuanto a la eficiencia operativa, sino también impulsando la agilidad y la capacidad de adaptación de las organizaciones.

La obtención de programas de producción en instalaciones industriales representa uno de los problemas que plantea mayores desafíos con respecto a una resolución eficiente. La posibilidad de encontrar soluciones óptimas se encuentra limitada, en gran medida, por la elevada complejidad computacional que distingue a estos problemas ([1], [2]). Considerando los inconvenientes que plantea la obtención de programas óptimos se vuelve imprescindible contar con procedimientos de solución efectivos para estos problemas, que aprovechen los recursos computacionales disponibles, suministrando soluciones competitivas, que reflejen los aspectos relevantes en la programación de operaciones en relación con la utilización de los recursos productivos ([1], [2], [3]).

En este trabajo se estudia específicamente el problema de secuenciación de trabajos repetitivos en entornos *flow shop just-in-time* en el contexto de las tecnologías de la Industria 4.0. El problema bajo estudio radica en determinar la mejor secuencia de producción para un grupo de trabajos repetitivos (no unitarios) que requieren ser procesados en una línea de fabricación/montaje constituida por una serie estaciones/centros de trabajo, observando que todos los trabajos sigan la misma secuencia de procesamiento a lo largo de la línea, en el contexto dispuesto para el funcionamiento de un sistema *just-in-time* que requiere, entre otros elementos, la nivelación de la producción (*heijunka*) en función de la demanda y del consumo de materiales y componentes sobre intervalos cortos de tiempo [4].

Se plantea entonces, como objetivo de este trabajo, efectuar un relevamiento preliminar de la literatura relacionada con la generación de secuencias de buena calidad en sistemas productivos del tipo *flow shop* bajo entornos *just-in-time* considerando el impacto de las tecnologías de Industria 4.0. Los indicadores de rendimiento que se consideran para determinar la calidad de las secuencias están asociados el aprovechamiento de las instalaciones y medidas de desempeño que tiene en cuenta el nivelado de la producción. El *makespan* ( $C_{m\acute{a}x}$ ) representa uno de los objetivos más utilizados para evaluar la calidad de las soluciones en problemas de secuenciación, desde el punto de vista del uso de los recursos productivos [5]. Por otra parte, el objetivo asociado con el nivelado de la producción puede expresarse a través de distintas métricas que calculan el valor de la desviación *heijunka* (*DH*), que refleja en qué medida no se respeta en la secuencia considerada la mezcla de producción requerida para cada tipo de producto/trabajo que se produce en la línea o el consumo ideal/promedio de componentes/materiales que intervienen en su producción [4].

En principio, cualquier problema de programación de operaciones puede formularse a través de un enfoque de programación matemática [5]. En el desarrollo de la teoría de *scheduling* se han empleado diversos enfoques para la resolución de problemas de secuenciación, incluyendo tanto aproximaciones exactas como (meta)heurísticas, que se han aplicado para diseñar algoritmos adaptados a distintos ambientes productivos [6].

El trabajo está estructurado de acuerdo con el esquema que se presenta a continuación. En la Sección 2 se describe el problema de secuenciación *flow shop* en ambientes *just-in-time* y se presenta una formulación de programación matemática bioobjetivo para modelarlo. Luego, en la Sección 3 se detalla el análisis preliminar de la literatura que incluye los conceptos relevantes relacionados con la problemática considerada. En la Sección 4 se efectúa una discusión en relación con lo relevado en la literatura sobre el tema, con el fin de definir posibles líneas de investigación futuras. Para finalizar, la Sección 5 expone las conclusiones del trabajo.

## 2 El Problema de Secuenciación Just-in-time

La metodología de producción *just-in-time* (JIT) busca reducir ciclos de manufactura, aumentar flexibilidad y calidad, y disminuir costos mediante un sistema logístico “de arrastre” o *pull* [4]. El principio básico de JIT es atender a los clientes en el momento preciso, con la cantidad exacta y productos de máxima calidad, minimizando inventarios y eliminando desperdicios. Los sistemas JIT crean un flujo de productos flexible para adaptarse a variaciones en la demanda y reducir desperdicios en el proceso de fabricación, utilizando diversas metodologías organizativas y tecnológicas denominadas técnicas de producción JIT [7].

Entre estas técnicas se encuentra el nivelado de la producción o *heijunka*, que impacta en la definición de secuencias de fabricación [4]. Como primer paso, esta técnica establece un plan de producción mensual considerando pronósticos de demanda, pedidos comprometidos e inventario existente. El nivelado de la producción fija una cantidad diaria que evita grandes oscilaciones, proporcionando patrones a los encargados de los centros de trabajo para sus requerimientos a corto plazo. La programación definitiva se realiza cuando se tienen los medios necesarios. Utilizando un sistema de señales, como *kanban*, se impulsa la fabricación en las celdas de manufactura que suministran los componentes. El objetivo es producir diariamente pequeños lotes variados en lugar de grandes series de un solo producto, lo que permite ajustarse mejor a las fluctuaciones de la demanda. Esta estabilidad distingue a los sistemas JIT de otras estrategias de gestión de la producción.

La estabilidad de la tasa de producción para los distintos tipos de productos a fabricar, o en el caso más general, la estabilidad de la tasa de utilización de materiales ha sido uno de los criterios usualmente aplicados para generar secuencias niveladas en líneas de ensamblado de modelos mixtos ([8], [9], [10]). La aplicación de *heijunka* requiere reducir los tiempos de preparación involucrados en el lanzamiento/preparación (*setup*) de series de producción de artículos de distinto tipo. Algunos autores ([11], [12]) han destacado la relación contrapuesta existente entre estos dos criterios.

Considerando específicamente los objetivos de este trabajo, para incluir los requerimientos relativos a la nivelación de la producción, que a su vez facilitan la implementación de estrategias de personalización masiva, vinculadas con los entornos Industria 4.0, se propone el objetivo de minimizar la desviación *heijunka* ( $DH$ ), que tiene en cuenta la desviación con respecto a la cantidad de producción ideal/promedio en cada etapa/posición de la secuencia considerada [13]. Por otra parte, se adiciona como medida de desempeño de las secuencias la minimización del *makespan* ( $C_{máx}$ ), calculado como el valor máximo entre los tiempos de terminación de todos los trabajos, para considerar los criterios de eficiencia y utilización de los recursos productivos.

Las hipótesis fundamentales adoptadas para la modelación del problema se introducen seguidamente:

- La configuración del sistema productivo corresponde a la estructura de un *flow shop* permutativo. Las secuencias de trabajo pueden considerarse equivalente para todos los trabajos, debido a que necesariamente todos los productos/trabajos deben ser procesados en todas las máquinas siguiendo el mismo orden de procesamiento.
- El análisis se limita al caso determinístico en el que se asumen conocidos el número de productos/trabajos a producir y sus respectivos tiempos de procesamiento.
- Cada trabajo puede procesarse a lo sumo en una única máquina o centro de trabajo en un instante de tiempo dado. Igualmente, cada máquina puede procesar un único trabajo por vez y todas las máquinas están disponibles en todo momento para procesar los trabajos cuando sea necesario. No existen prioridades de procesamiento entre los trabajos en cada máquina.
- El tiempo de traslado de los trabajos entre operaciones se consideran despreciables.
- No existen restricciones en cuanto al espacio de almacenamiento intermedio entre máquinas/estaciones de la línea de producción o celda de manufactura.
- El tiempo de preparación (*setup*) asociado al cambio de tipo de producto/trabajo en una estación/máquina de la línea de producción es nulo o insignificante.

Al intentar resolver este problema se busca generar secuencias de producción niveladas, que alcancen una adecuada (máxima) estabilidad en la tasa de consumo o utilización de los distintos componentes o recursos al mismo tiempo que se minimiza el tiempo total de fabricación.

## 2.1 Un Planteamiento Formal del Problema de Secuenciación en Entornos Just-in-time.

En los sistemas de producción JIT, el problema general de secuenciación puede explicarse, esencialmente, a través de los siguientes elementos: un número,  $I$ , de distintos tipos de productos/trabajos, la demanda,  $d_i$ , para cada tipo de producto  $i$  ( $i = 1, \dots, I$ ), un número,  $M$ , de distintos componentes o recursos y el consumo unitario,  $b_{im}$ , del componente  $m$  ( $m = 1, \dots, M$ ) por unidad del tipo de producto  $i$ . Todos los productos se producen en la misma instalación, en general, una línea de ensamblado o celda de manufactura de modelos mixtos, conformada por  $L$  estaciones o centros de trabajo. Cada producto  $j$  ( $j = 1, \dots, J$ ) requiere un tiempo de procesamiento  $p_{jl}$  en cada

estación  $l$  ( $l = 1, \dots, L$ ).  $K$  es la demanda total para todos los tipos de artículos,  $N_m$  es la cantidad total del componente  $m$  requerida para producir los  $K$  artículos y  $\lambda_m = N_m/K$  se conoce con el nombre de tasa de consumo ideal para el componente  $m$ . El objetivo ideal que se persigue, desde la perspectiva del nivelado de la producción, contempla que, en cada etapa/posición de la secuencia, la línea/celda produzca artículos del tipo  $i$  de forma tal que el consumo real de cada componente  $m$  iguale el consumo dado por su tasa ideal,  $\lambda_m$ . Si una secuencia verificara la condición anterior estaría perfectamente nivelada. Puesto que desde una perspectiva práctica no resulta factible, en el caso general, encontrar una secuencia de tal tipo, los sistemas de gestión JIT buscan mantener el consumo real de cada componente tan próximo como resulte posible al consumo ideal. Al mismo tiempo se persigue minimizar el tiempo total requerido para el procesamiento de todos los trabajos (minimización del *makespan*) con el fin de maximizar el aprovechamiento de las instalaciones.

A continuación, se presenta una formulación de programación matemática multiobjetivo para el problema utilizando un planteamiento basado parcialmente en [14].

Índices y parámetros:

- $i$ : Índice asociado con el tipo de producto/trabajo;  $i = 1, \dots, I$ .
- $j$ : Índice asociado con el producto/trabajo;  $j = 1, \dots, J$ .
- $k$ : Posición dentro de la secuencia de fabricación de  $K$  productos/trabajos;  $k = 1, \dots, K$ .
- $l$ : Índice asociado con la máquina/estación de la línea de producción;  $l = 1, \dots, L$ .
- $m$ : Índice asociado con los componentes/recursos requeridos para la producción de los productos/trabajos;  $m = 1, \dots, M$ .
- $p_{jl}$ : Tiempo de procesamiento del producto/trabajo  $j$  en la máquina  $l$  ( $p_{jl} > 0$ ).
- $b_{im}$ : Cantidad del componente/recurso  $m$  requerida para la fabricación de una unidad del tipo de producto/trabajo  $i$ .
- $d_i$ : Cantidad demandada del tipo de producto/trabajo  $i$ .
- $K$ : Sumatoria de las cantidades demandadas de los distintos tipos de productos/trabajos,  $K = \sum_{i=1}^I d_i$ .
- $N_m$ : Cantidad total del componente/recurso  $m$  requerida para la fabricación de los  $K$  productos/trabajos,  $N_m = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I d_i \times b_{im}$ .
- $\lambda_m$ : Tasa de consumo (proporción) ideal/media del componente  $m$ ,  $\lambda_m = \frac{N_m}{K}$ .
- $r_{ij}$ : Parámetro que toma el valor 1 si el producto/trabajo  $j$  pertenece al tipo  $i$ , o el valor 0 en caso contrario.

Variables:

- $X_{jk}$ : Variable binaria que toma el valor 1 si el producto/trabajo  $j$  se asigna a la posición  $k$  de la secuencia; o el valor 0 en cualquier otro caso.
- $P_{kl}$ : Tiempo de procesamiento del producto/trabajo situado en la posición  $k$  de la secuencia en la máquina  $l$ .
- $B_{kl}$ : Tiempo de inicio de operación del producto/trabajo situado en el lugar  $k$  de la secuencia en la máquina  $l$ .

- $C_{kl}$ : Tiempo de finalización de la operación del producto/trabajo situado en la posición  $k$  de la secuencia en la máquina  $l$ .
- $C_{m\acute{a}x}$ : Makespan, tiempo máximo de finalización del último producto/trabajo procesado en la última máquina.
- $Y_{ik}$ : Cantidad de unidades del tipo de producto/trabajo  $i$  producidas hasta la etapa  $k$ .

Modelo:

$$\text{Minimizar } \{ f_1; f_2 \} \quad (1)$$

$$f_1 = C_{m\acute{a}x} \quad (2)$$

$$f_2 = \frac{\text{m\acute{a}x}_{k,m} F(\sum_{i=1}^I (Y_{ik} b_{im}) - k\lambda_m)}{\text{M\acute{a}xima desviaci\acute{o}n}}; \text{ o, } f_2 = \frac{\sum_k \sum_m F(\sum_{i=1}^I (Y_{ik} b_{im}) - k\lambda_m)}{\text{Desviaci\acute{o}n total}} \quad (3)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^N X_{jk} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, D \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^D X_{jk} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$Y_{ik} = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^k X_{jq} r_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I \quad \forall k = 1, \dots, D \quad (6)$$

$$P_{kl} = \sum_{j=1}^N X_{jk} p_{jl} \quad \forall k = 1, \dots, D \quad \forall l = 1, \dots, M \quad (7)$$

$$C_{kl} = B_{kl} + P_{kl} \quad \forall k = 1, \dots, D \quad \forall l = 1, \dots, M \quad (8)$$

$$B_{kl} \geq C_{(k-1)l} \quad \forall k = 2, \dots, D \quad \forall l = 1, \dots, M \quad (9)$$

$$B_{kl} \geq C_{k(l-1)} \quad \forall l = 2, \dots, M \quad \forall k = 1, \dots, D \quad (10)$$

$$C_{m\acute{a}x} \geq C_{kM} \quad \forall k = 1, \dots, D \quad (11)$$

$$B_{k1} \geq 0 \quad \forall k = 1, \dots, N \quad (12)$$

$$X_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j = 1, \dots, N \quad \forall k = 1, \dots, D \quad (13)$$

Las Ecuaciones (1) a (3) introducen los objetivos del problema: minimización del *makespan* ( $C_{m\acute{a}x}$ ) y de la desviación heijunka ( $DH$ ). Las Ecuaciones (4) y (5) exigen, por un lado, que, en toda máquina o estación, solamente un producto/trabajo sea asignado a cada posición de la secuencia, y, por el otro, que una única posición de la secuencia sea asignada a cada producto/trabajo en toda máquina. La Ecuación (6) determina la cantidad de unidades del producto/trabajo tipo  $i$  secuenciados hasta la posición  $k$ .

La Ecuación (7) determina el tiempo de procesamiento del producto/trabajo situado en la posición  $k$  de la secuencia en la máquina  $l$ . La Ecuación (8) define el tiempo de terminación de la operación del trabajo/producto asignado a la posición  $k$  de la secuencia en la máquina  $l$ . Por otro lado, el inicio de la operación del trabajo/producto asignado a la posición  $k$  de la secuencia en la máquina  $l$  debe ser mayor o igual que el tiempo de terminación de la operación previa en la misma máquina (Ecuación (9)). La Ecuación (10) requiere que el comienzo de la operación del producto/trabajo situado en

la posición  $k$  de la secuencia en la máquina  $l$  sea mayor o igual que el tiempo de terminación de la operación previa del mismo producto/trabajo. Por su parte, la Ecuación (11) define el *makespan* como el tiempo máximo de finalización de todos los trabajos. La Ecuación (12) restringe el comienzo de la primera operación del producto/trabajo  $j$ . La Ecuación (13) define las variables binarias del modelo.

La función vinculada con el objetivo de nivelado de la producción,  $F$ , es una función no negativa y convexa tal que  $F(x) = 0$ , si y solo si  $x = 0$ .  $F(\sum_{i=1}^I(Y_{ik}b_{im}) - k\lambda_m)$  penaliza la desviación del consumo real,  $\sum_{i=1}^I(Y_{ik}b_{im})$ , respecto del ideal,  $k\lambda_m$ . Como se observa en la Ecuación (3) se puede considerar para calcular  $DH$  una función que penalice la máxima desviación o una que penalice la desviación total. El modelo de máxima desviación fue investigado por [15] adoptando  $F(x) = |x|$ . Una de las aproximaciones más utilizadas para la función de desviación total se propuso en [16]:

$$U = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (\sum_{i=1}^I(Y_{ik} b_{im}) - kN_m/K)^2 \tag{14}$$

$U$  calcula la estabilidad de la tasa de consumo de los distintos componentes o recursos y, de forma indirecta, la estabilidad en la tasa de producción de los distintos tipos de productos. Un mejor nivelado de la producción se consigue con valores pequeños de  $U$ .

El problema de secuenciación JIT está influido por las consideraciones generales que les caben a los problemas de optimización combinatoria respecto de su complejidad computacional. Un análisis detallado de estos aspectos puede consultarse en [17].

El número de secuencias posibles,  $\eta$ , correspondientes a un problema de secuenciación JIT particular, caracterizado por los parámetros  $I$  y  $d_i, i = 1, \dots, I$ , puede determinarse mediante la Ecuación (15).

$$\eta = (\sum_{i=1}^I d_i)! / \prod_{i=1}^I d_i! \tag{15}$$

Para ejemplificar, supóngase que se debe determinar una secuencia de producción para siete unidades del tipo de artículo A, cuatro de B y tres de C, y se tienen los requerimientos unitarios de recursos/componentes por de tipo de producto,  $b_{im}$ , indicados en la Tabla 1. Además, en la Tabla 2 se indican los tiempos de procesamiento unitarios,  $p_{jl}$ , en las cinco estaciones de la celda de manufactura. El número de secuencias posibles, calculado a través de la Ecuación (15) asciende a 120 120. Al duplicar las cantidades para los tipos de producto B y C, se tendrán 349 188 840 secuencias posibles.

**Tabla 1.** Requerimientos unitarios de recursos para el ejemplo.

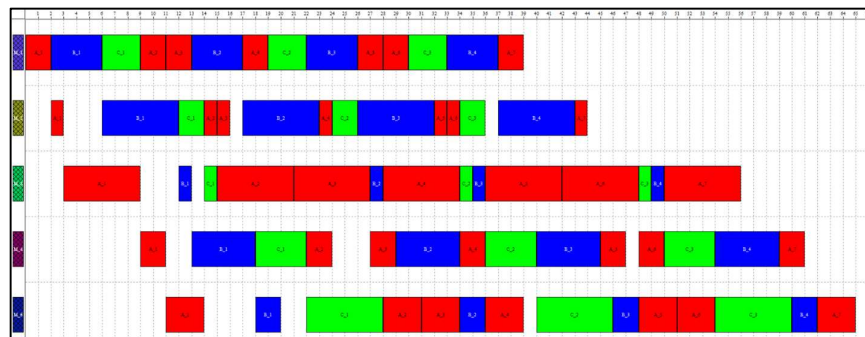
$b_{im}$	R_1	R_2	R_3
A	5	2	1
B	4	6	3
C	2	3	7

Para el ejemplo planteado puede proponerse la siguiente secuencia de producción: AAAAAAABBBBCCC, que minimiza cantidad de preparaciones/*setups* que deben efectuarse en la celda de manufactura. A esta le corresponde un valor de estabilidad de la tasa de consumo de componentes de 1837,07, obtenida a partir de la Ecuación (14) y

un valor de  $C_{m\acute{a}x}$  de 89. Otra secuencia factible para el problema es la que sigue: ABCAABACBAACBA, a esta le corresponde un valor de  $U$  de 67,36, por lo tanto, da lugar a un mejor nivelado de la producci3n que la anterior, y tiene un valor de  $C_{m\acute{a}x}$  de 65. Su representaci3n gr\afica puede verse en la Fig. 1. Al plantear la mejora del objetivo dado por el  $C_{m\acute{a}x}$  se puede llegar a la siguiente secuencia: ACACCABABABABA, con un valor de  $U = 458,21$  y  $C_{m\acute{a}x} = 59$ . El diagrama de Gantt correspondiente de la programaci3n se presenta en la Fig. 2.

**Tabla 2.** Tiempos de procesamiento unitarios para el ejemplo.

$p_{jl}$	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
A_1	2	1	6	2	3
A_2	2	1	6	2	3
A_3	2	1	6	2	3
A_4	2	1	6	2	3
A_5	2	1	6	2	3
A_6	2	1	6	2	3
A_7	2	1	6	2	3
B_1	4	6	1	5	2
B_2	4	6	1	5	2
B_3	4	6	1	5	2
B_4	4	6	1	5	2
C_1	3	2	1	4	6
C_2	3	2	1	4	6
C_3	3	2	1	4	6



**Fig. 1.** Diagrama de Gantt de la secuencia que optimiza el nivelado.

### 3 An\alisis de la Literatura

La filosofa *heijunka*, centrada en el nivelado de la producci3n, busca minimizar las variaciones en la demanda y lograr un flujo constante de trabajo. Investigaciones como las de Womack, Jones y Roos [18] han planteado la necesidad de desarrollar estrategias



de secuenciación que apliquen principios *heijunka* para suavizar la carga de trabajo y reducir los cuellos de botella, mejorando así la eficiencia y la capacidad de respuesta.

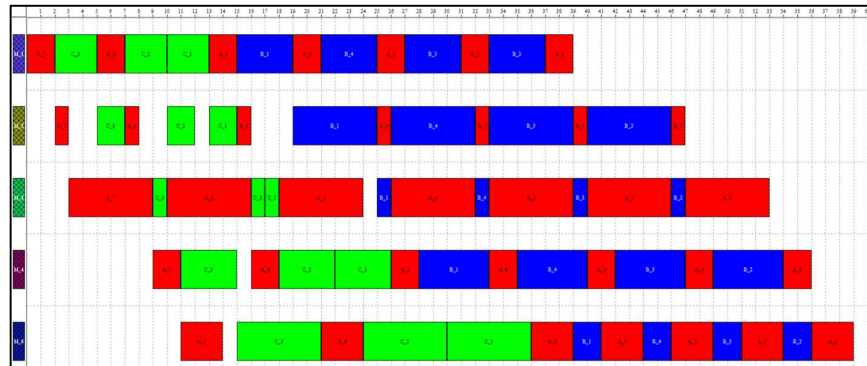


Fig. 2. Diagrama de Gantt de la secuencia que optimiza el *makespan*.

Por otra parte, en Rother y Shook [19] han destacado la importancia de nivelar la producción para reducir el desperdicio y mejorar la eficiencia en entornos de fabricación *flow shop*.

Diversos estudios han desarrollado modelos matemáticos para la secuenciación JIT que tienen como objetivo la minimización del *makespan*, es decir, el tiempo total requerido por el proceso de producción. Investigaciones como las de Allahverdi y otros [20] han recopilado algoritmos y enfoques que buscan optimizar el *makespan* considerando algunas restricciones características de entornos JIT.

Existen estudios de caso que ilustran la aplicación práctica de estrategias de secuenciación JIT centradas en el nivelado de la producción y la optimización del *makespan*. En [4] se presentan experiencias exitosas en la implementación de sistemas *heijunka* en entornos de producción, destacando los beneficios obtenidos en términos de eficiencia y flexibilidad.

La minimización del *makespan*, es decir, el tiempo total necesario para completar todas las tareas en un *flow shop*, es un objetivo crucial en entornos *Lean*. Trabajos como el de Womack y Jones [21] han enfatizado la importancia de eliminar el desperdicio y mejorar la eficiencia del sistema para reducir el *makespan* y aumentar la capacidad de respuesta ante la demanda del cliente.

Los problemas de producción del tipo *flow shop*, representan uno de los problemas más difundidos en los distintos sistemas de producción y gestión de operaciones. En los últimos años los sistemas de producción han sido afectados en un grado creciente por los procesos de transformación digital, comúnmente llamado cuarta revolución industrial (Industria 4.0), dando lugar a sistemas de producción digitalizados e interconectados entre sí ([22], [23]). Estos cambios, en donde los procesos de toma de decisión se convierten en descentralizados, generan un desafío muy grande para las estructuras tradicionales de organización industrial, en donde los enfoques jerárquicos eran la

principal estrategia [24]. En la actualidad, los sistemas ciberfísicos (CPS, del inglés *cyber-physical systems*) reemplazan a los tradicionales sistemas de producción, posibilitando integrar en un único sistema tanto los procesos físicos (en donde se transforma la materia prima) como los procesos de gestión y control (donde se toman las decisiones). Los CPS conectados por Internet de las cosas (IoT, del inglés *internet of things*), pueden compartir con otros CPS datos que antes quedaban confinados en los activos físicos (máquinas productivas), y también pueden asociarse arquitecturas que vinculen centros de cómputo a los CPS, como por ejemplo a través de la nube [25]. Esto posibilita tener una versión digitalizada del proceso productivo y de su estado en tiempo real junto con la capacidad de procesar todos esos datos, lo que da lugar a los gemelos digitales (o *Digital Twins*, DT) [26]. Los *Digital Twins* son una réplica del proceso de producción con información actualizada en tiempo real, que les proporciona a los sistemas de apoyo a la toma de decisión herramientas para analizar de manera ágil y flexible los datos provenientes de los CPS ([27], [28]).

Asimismo, se han incorporado tecnologías autónomas en el manejo de materiales, como los vehículos autónomos (AGV, *automatic guided vehicle*) o robots móviles. Estas tecnologías han permitido profundizar la capacidad de los sistemas de producción de manejarse de forma autónoma, logrando que el diseño de *layout* pueda ser más flexible, ya que los AVG pueden adaptarse fácilmente a modificaciones en los procesos [29]. Incorporar herramientas autónomas en las operaciones intralógicas o manejo de materiales dentro del *shop-floor*, conllevan a que la capacidad del sistema de adaptarse a distintas configuraciones o requerimientos se aumente considerablemente. Sin embargo, lograr sacar el mayor rédito de estas tecnologías, requiere optimizar los procesos de manejo de materiales y coordinar su operación con el resto del *shop-floor* ([30], [31]). Por lo tanto, si bien la potencialidad de sincronizar operaciones es cada vez mayor, las exigencias y desafíos para la planificación de operaciones y producción son cada vez mayores [32]. Igualmente, el uso y consumo de materiales a lo largo de los procesos de producción están directamente relacionados a la planificación de las órdenes de producción. Un consumo balanceado de componentes y materias primas permite que el flujo de materiales pueda ser más estable, de acuerdo con lo que propugna en las metodologías de *lean manufacturing*, sin necesidad de mover grandes volúmenes de piezas únicas, generando almacenamientos intermedios temporales [33].

En resumen, la literatura relacionada con la secuenciación de la producción en configuraciones *flow shop* bajo principios de JIT y *lean manufacturing*, considerando el nivelado de la producción (*heijunka*) y la optimización del *makespan*, proporciona una amplia gama de enfoques y técnicas individuales para mejorar la eficiencia y la capacidad de respuesta en los procesos de fabricación. Se requiere una consideración simultánea e integrada de estos principios y herramientas para ayudar a las organizaciones a alcanzar niveles más altos de rendimiento operativo y competitividad en el mercado.

Estas temáticas relacionadas con la integración de diversos aspectos de la gestión de materiales en entornos de producción Industria 4.0 han sido muy poco estudiadas, observándose que los primeros trabajos son recientes. Más aún, si se consideran problemas de *scheduling* en configuraciones productivas del tipo *flow shop*, los casos escasean aún más en la literatura [34]. Por ello se propone en el futuro desarrollar una línea de investigación que permita contribuir a mejorar el entendimiento de estos problemas.

## 4 Discusión

La secuenciación de la producción en entornos *flow shop* con enfoque JIT y su integración con las tecnologías de la Industria 4.0 ha sido poco explorada en la literatura académica. El JIT es reconocido por reducir inventarios y tiempos de espera, mejorando eficiencia y calidad al sincronizar producción con demanda. En entornos *flow shop*, el JIT minimiza desperdicios y maximiza la utilización de recursos. La Industria 4.0, con tecnologías como IoT, la inteligencia artificial y el análisis de *big data*, puede transformar la producción al mejorar visibilidad y control de la cadena de suministro, optimizar planificación y permitir personalización masiva. La literatura resalta cómo la integración de estas tecnologías en entornos *flow shop* puede contribuir a aumentar la flexibilidad, la eficiencia y la adaptabilidad a cambios del mercado ([35], [36]).

Si bien la literatura ha explorado los beneficios potenciales de la integración del enfoque JIT y las tecnologías de la Industria 4.0 en entornos *flow shop*, aún persisten varios desafíos y áreas de investigación futura. Entre estos se incluyen el desarrollo de modelos de optimización más avanzados que consideren explícitamente múltiples objetivos de interés en la determinación de secuencias de producción, la incertidumbre en la demanda y los tiempos de procesamiento, la evaluación de la factibilidad técnico-económica de la implementación de ciertas tecnologías 4.0 en entornos *flow shop* y la identificación de prácticas óptimas para la gestión de materiales y la información en este contexto ([37], [38]).

En resumen, la literatura existente proporciona una base sólida para comprender los beneficios y desafíos asociados con la secuenciación de la producción en entornos *flow shop* bajo un enfoque JIT y la influencia de las tecnologías de la Industria 4.0. Sin embargo, se necesitan investigaciones adicionales para abordar cuestiones pendientes y aprovechar todo el potencial de estas estrategias integradas en la optimización de las cadenas de valor.

En este sentido se requiere profundizar en el desarrollo de los modelos conceptuales del problema que permiten vincular las distintas características y comenzar a definir de forma concreta cómo se integran las operaciones de manejo de material con los de *scheduling*. Para esto resulta clave apoyarse en los trabajos previos en problemas del tipo *flow shop* que está caracterizado como un problema *NP-hard* [39].

Las relaciones y consideraciones plasmadas en los modelos conceptuales deben expresarse a través de modelos formales recurriendo a la programación matemática. Como caso de estudio podrían considerarse las instancias Nissan-9Eng.I [40], que incluyen datos recolectados de una planta Nissan situada en Barcelona, España. Estas instancias representan procesos productivos secuenciales (del tipo *flow shop*) para la fabricación de distintos componentes de vehículos.

Para abordar la complejidad computacional de estos problemas, se deben utilizar métodos como las metaheurísticas, que permiten obtener soluciones de buena calidad con un esfuerzo computacional razonable. Estas han demostrado un gran desempeño en problemas de *scheduling* donde los métodos exactos fallan. Dada la complejidad de los problemas considerados, resulta necesario evaluar diferentes enfoques metaheurísticos, como los basados en métodos evolutivos (por ejemplo, algoritmos genéticos) o aquellos como *simulated annealing* y *tabu search*.

Los métodos metaheurísticos, aunque no garantizan resultados óptimos, son ampliamente utilizados para resolver problemas NP-hard. Estos métodos suelen emplear mecanismos de aleatorización para explorar soluciones y avanzar en el proceso de optimización, pero requieren estrategias de control estadístico para asegurar una buena convergencia. Para calibrar y ajustar estos métodos, se utilizan herramientas estadísticas como el diseño de experimentos. Esto resulta esencial para asegurar la estabilidad y reproducibilidad de las soluciones en las contribuciones que se desarrollen en esta área.

## 5 Conclusiones

La revisión preliminar de la literatura sobre la secuenciación multiobjetivo de la producción en configuraciones *flow shop* bajo los principios de JIT y *lean manufacturing* revela una serie de hallazgos significativos y tendencias emergentes. Se observa una clara tendencia hacia la integración de objetivos relacionados con el nivelado de la producción (*heijunka*) y la optimización del *makespan* en los procesos de secuenciación, con el fin de mejorar la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta en entornos de fabricación.

Uno de los principales hallazgos es la importancia de considerar múltiples objetivos simultáneamente en la secuenciación de la producción, en lugar de optimizar cada objetivo de manera independiente. Esto se debe a la naturaleza interconectada de los objetivos relacionados con el nivelado de la producción y la utilización de las instalaciones, donde la mejora en un área puede afectar directamente a otras.

Por otro lado, se destaca la relevancia de los enfoques multiobjetivo, basados en algoritmos metaheurísticos tales como *simulated annealing*, *tabú search* y algoritmos evolutivos, para encontrar soluciones eficientes que equilibren los diferentes objetivos de manera efectiva. Estos enfoques permiten a los decisores explorar el espacio de soluciones de manera más completa y encontrar compromisos óptimos entre los objetivos.

Asimismo, se identifica la necesidad de integrar tecnologías emergentes, relacionadas con la gestión de materiales, la simulación por computadora y el análisis de datos en tiempo real, para mejorar la precisión y la eficiencia en la secuenciación de la producción. La aplicación de estas tecnologías puede revelar aspectos relevantes sobre el rendimiento del sistema y facilitar la toma de decisiones informadas en tiempo real.

En síntesis, la revisión de la literatura destaca la importancia de adoptar un enfoque integral y orientado al rendimiento en la secuenciación de la producción en configuraciones *flow shop* bajo principios de JIT y *lean manufacturing*. Se subraya la necesidad de seguir investigando y desarrollando nuevas estrategias, modelos y herramientas que permitan abordar de manera efectiva los desafíos emergentes en la dirección de operaciones en un entorno de negocios en constante evolución.

**Agradecimientos.** Los autores desean agradecer el financiamiento recibido a través de los Proyectos de Grupos de Investigación 24/ZJ39 y 24/J084 de la Universidad Nacional del Sur.

**Declaración de Intereses.** Los autores no tienen intereses conflictivos para declarar que sean relevantes en relación con el contenido de este artículo.

## Referencias

1. Blazewicz, J., Ecker, K.H., Pesch, E., Schmidt, G., Weglarz, J.: Handbook on scheduling: from theory to applications. Springer, Berlin Heidelberg (2007)
2. Pinedo, M.L.: Scheduling: Theory, algorithms, and systems. 5ta. edición. Springer Cham, Heidelberg (2016)
3. Framiñán, J.M., Leisten, R., García, R.R.: Manufacturing scheduling systems. Springer, London (2014)
4. Monden, Y.: Toyota production system: an integrated approach to just-in-time. Productivity Press, New York (2011)
5. Baker, K.R., Trietsch, D.: Principles of sequencing and scheduling. 2da. edición. Wiley, Hoboken (2019)
6. Gmys, J., Mezmaz, M., Melab, N., Tuytens, D.: A computationally efficient branch-and-bound algorithm for the permutation flow-shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research* **284**(3), 814–833 (2020)
7. Marín, F., Delgado, J.: Las técnicas justo a tiempo y su repercusión en los sistemas de producción. *Revista de Economía Industrial* **1**(331), 35–41 (2000)
8. Sumichrast, R., Rusell, R.: Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for JIT production systems. *Journal of Operations Management* **9**(3), 371–390 (1990)
9. Bautista-Valhondo, J.: Heijunka-inspired planning and sequencing methods in the apportionment problem in electoral systems. *Dirección y Organización* **1**(73) 18–38 (2021)
10. Zhou, B.-H., Peng, T.: Optimal schedule of just-in-time part distribution for mixed-model assembly lines. *Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban)/Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)* **47**(4), 1253–1261 (2017)
11. McMullen, P., Frazier, G.: A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a JIT line. *IIE Transactions* **32**(8), 679–686 (2000)
12. McMullen, P.: JIT sequencing for mixed-model assembly lines with setups using tabu search. *Production Planning & Control* **9**(5), 504–510 (1998)
13. Bautista, J., Companys, R., Corominas, A.: Heuristics and exact algorithms for solving the Monden problem. *European Journal of Operational Research* **88**(1), 101–113 (1996)
14. Shao, X., Wang, B., Rao, Y., Gao, L., Xu, C.: Metaheuristic approaches to sequencing mixed-model fabrication/assembly systems with two objectives. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **48**(9–12), 1159–1171 (2010)
15. Steiner, G., Yeomans, S.: Level schedules for mixed model JIT processes. *Management Science* **39**(69), 728–735 (1993)
16. Miltenburg, J.: Level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems. *Management Science* **35**(2), 192–207 (1989)
17. Brauner, N., Crama, Y.: The maximum deviation just-in-time scheduling problem. *Discrete Applied Mathematics* **134**(1–3), 25–50 (2004)
18. Womack, J.P., Jones, Daniel T., Roos, D.: The machine that changed the world: The story of lean production. Free Press, New York (1990)
19. Rother, M., Shook, J.: Learning to see. Lean Enterprise Institute (LEI), Cambridge (2003)
20. Allahverdi, A., Ng, C.T., Cheng, T., Kovalyov, M.Y.: A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research* **187**(3) 985–1032 (2008)
21. Womack, J.P., Jones, D.T.: Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation. Free Press, New York (2003)
22. Monostori, L.: Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP* **17**, 9–13 (2014)

23. Xu, L. D., Xu, E.L., Li, L.: Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research* **56**(8), 2941–2962 (2018)
24. Bueno, A., Godinho Filho, M., Frank, A.G.: Smart production planning and control in the Industry 4.0 context: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering* **149**, 106774 (2020)
25. Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., Ueda, K.: Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals* **65**(2), 621–641 (2016)
26. Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., Sui, F.: Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **94**(9), 3563–3576 (2018)
27. Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.A.: A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* **3**, 18–23 (2015)
28. Tao, F., Qi, Q., Liu, A., Kusiak, A.: Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems* **48**, 157–169 (2018)
29. Fragapane, G.I., Zhang, C., Sgarbossa, F., Strandhagen, J.O.: An agent-based simulation approach to model hospital logistics. *International Journal of Simulation Modelling* **18**(4), 654–665 (2019)
30. Fragapane, G., De Koster, R., Sgarbossa, F., Strandhagen, J.O.: Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research* **294**(2), 405–426 (2021)
31. Fragapane, G., Ivanov, D., Peron, M., Sgarbossa, F., Strandhagen, J.O.: Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics. *Annals of Operations Research* **308**(1–2), 125–143 (2022)
32. De Ryck, M., Versteyhe, M., Debrouwere, F.: Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. *Journal of Manufacturing Systems* **54**, 152–173 (2020)
33. Bautista-Valhondo, J., Alfaro-Pozo, R.: Mixed integer linear programming models for flow shop scheduling with a demand plan of job types. *Central European Journal of Operations Research* **28**(1), 5–23 (2020)
34. Komaki, G.M., Sheikh, S., Malakooti, B.: Flow shop scheduling problems with assembly operations: a review and new trends. *International Journal of Production Research* **57**(10), 2926–2955 (2018)
35. Ali, S.S., Kaur, R.: Exploring the impact of technology 4.0 driven practice on warehousing performance: a hybrid approach. *Mathematics* **10**(8), 1252 (2022)
36. Frazzon, E.M., Agostino, Í.R.S., Broda, E., Freitag, M.: Manufacturing networks in the era of digital production and operations: A socio-cyber-physical perspective. *Annual Reviews in Control* **49**, 288–294 (2020)
37. Kang, S., Jin, R., Deng, X., Kenett, R.S.: Challenges of modeling and analysis in cybermanufacturing: a review from a machine learning and computation perspective. *Journal of Intelligent Manufacturing* **34**, 415–428 (2023)
38. Queiroz, M., Fosso Wamba, S., Chiappetta Jabbour, C., Lopes de Sousa Jabbour, A., Machado, M.: Adoption of Industry 4.0 technologies by organizations: a maturity levels perspective. *Annals of Operations Research* (2022). <https://doi.org/10.1007/s10479-022-05006-6>
39. Garey, M.R., Johnson, D.S., Sethi, R.: The complexity of flowshop and jobshop scheduling. *Mathematics of Operations Research* **1**(2), 117–129 (1976)
40. Bautista-Valhondo, J.: Exact and heuristic procedures for the Heijunka-flow shop scheduling problem with minimum makespan and job replicas. *Progress in Artificial Intelligence* **10**(4) 465–488 (2021)