



Sistema de producción multi-línea optimizado por PSO

Multiple system of production optimized by PSO

Quezada-Aguilar Víctor

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Escuela Superior de Tizayuca

Correo: victor_quezada@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8806-7880>

Seck Tuoh-Mora Juan Carlos

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Área académica de Ingeniería

Correo: jseck@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3678-1120>

Quezada-Quezada Jose Carlos

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Escuela Superior de Tizayuca

Correo: jcarlos@uaeh.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3125-3708>

Cuatepotzo-Bravo Arturo

Instituto Tecnológico de Monterrey

Campus Hidalgo, Ingeniería

Correo: acuatepotzo@tec.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9513-9982>

Resumen

La competitividad en el sector industrial nacional e internacional exige variabilidad de productos, donde la flexibilidad de los sistemas productivos es el eje principal. Sin embargo, el manejo inadecuado de los recursos disminuye el factor de competencia en los mercados. Este documento analiza el problema de asignación de órdenes de producción en un sistema flexible, que tiene 4 líneas productivas, donde cada una cuenta hasta con 6 estaciones de trabajo. La producción es de 10 lotes, cada uno de ellos contiene hasta 5 productos diferentes. El objetivo es encontrar la asignación de lotes para su procesamiento en las líneas de producción, que optimicen el tiempo total de procesamiento, así como el tiempo total de demora. Para lograr el objetivo se evalúan soluciones en un simulador del sistema productivo; la optimización de las funciones objetivo le corresponde al algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization). La optimización se realiza primero para cada función objetivo y después para ambas considerando pesos ponderados. Los resultados muestran correlación en los valores de las funciones objetivo, sin embargo la solución del óptimo de la función objetivo 1 no lo es para la función objetivo 2 y viceversa. Una limitante en el proceso de optimización es la aleatoriedad que existe en el sistema de producción, lo que implica tener valores diferentes para una misma solución. No obstante, el proceso de optimización mantiene la solución óptima.

Descriptores: Optimización, órdenes de producción, PSO, sistema de producción, manufactura flexible.

Abstract

The competitiveness in the national and international industrial sectors requires product variability, where the flexibility of the production systems is the central axis. However, the inadequate management of resources diminishes the competition factor in the markets. The document considers the problem of assigning production orders in a flexible system that has four production lines where each one has up to 6 work stations. The production is of 10 lots where each of them contains up to 5 different products. The objective is to find the allocation of batches for processing to the production lines, which optimize the total processing time as well as the total delay time. To achieve the objective, solutions are evaluated in a production system simulator where the optimization of the objective functions corresponds to the PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm. The optimization is done first for each objective function and then taking both considering weighted weights. The results show a correlation in the values of the objective functions. Nevertheless, the solution of the optimum of the objective function 1 is not for objective function 2 and vice versa. One limitation in the optimization process is the randomness that exists in the production system, which implies having different values for the same solution; however, the optimization process maintains the optimal solution.

Keywords: Optimization, production orders, PSO, production system, flexible manufacturing.

INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas de producción elaboran una gran variedad de productos, y en la mayoría de las ocasiones en bajo volumen, fabricados bajo pedido. La diversificación de productos en una línea de producción hace complejo reducir costos de producción, satisfacción de los requerimientos específicos del cliente, así como cumplir con las fechas de entrega (Mori & Mahalec, 2017). La planeación y programación de la producción resulta ser clave en la decisión que maximice la productividad, asignando la cantidad adecuada de recursos a los requisitos de la demanda a lo largo del sistema de producción (Hoon-Kim & Hoon-Lee, 2016). Sin embargo, a menudo se resuelven por separado de manera secuencial. Es decir, un problema de planificación se puede resolver para determinar las cantidades de producción semanales de acuerdo con los pedidos del cliente, después las cantidades de producción semanales pasan a la programación y se determina un programa de producción para cada semana asignando una tarea operativa a una unidad de trabajo o línea de producción capaz de secuenciar las actividades (Chu *et al.*, 2015).

De acuerdo con Bellgran & Säfsten (2010), la programación de órdenes de producción es la forma adecuada de un conjunto de trabajos que esperan ser procesados por una o un conjunto de máquinas dispuestas en correcta secuencia tecnológica, que permita reducir tiempos de ejecución, procesamiento y entrega, asimismo, minimizando costos de producción. La programación generalmente se aborda de dos maneras:

- 1) Creando una tabla de tiempo basada en los recursos para completar el trabajo en un horizonte a corto plazo, y
- 2) Determinando la prioridad de los trabajos para un recurso inactivo mejorando las medidas de desempeño (Hoon-Kim & Hoon-Lee, 2016).

Con frecuencia, la programación de órdenes de producción se realiza a través de la experiencia o intuición, sin embargo, la asignación realizada la mayoría de las veces no es la apropiada. Una asignación errónea trae consigo incremento en los costos de producción, penalizaciones en entregas tardías o por faltantes, inventario en la línea de producción, desprestigio de la marca, así como pérdida de competitividad en el mercado.

La complejidad de la programación de órdenes de producción evoluciona constantemente dado el comportamiento de mercado y el avance tecnológico. Hasta el momento, investigaciones realizadas han tratado el

tema, pero de manera particular, dirigidas a problemas específicos como lo muestran Man *et al.* (2000), donde abordaron los problemas de planeación y programación de la producción en un entorno de producción multi-producto considerando el tamaño de lote. Los autores Józefowska & Zimniak (2008), presentaron un sistema que apoya la toma de decisiones en la planeación y programación de la producción a corto plazo en plantas de producción caracterizadas por un proceso de fabricación de una sola operación, así como Guinet (2001); Leung *et al.* (2017); Timpe & Kallrath (2000) investigaron el problema de planeación de la producción para múltiples sitios donde consideran a cada sitio como una unidad de producción independiente y paralela. En el trabajo de Guo *et al.* (2013) consideran la asignación de órdenes de producción en plantas situadas en diferentes lugares con fechas de entrega en el almacén central. Usualmente estos casos pertenecen a problemas de planeación agregada. Sin embargo, pocos estudios han investigado la asignación de órdenes de producción entre diferentes líneas productivas (multi-línea) considerando lotes de producción con características diferentes entre cada uno de ellos (multi-producto).

Este documento describe la optimización de un sistema de producción con características multi-línea y multi-producto, obteniendo la óptima asignación de órdenes de producción; su desarrollo se divide en tres secciones: Análisis y descripción del sistema de producción multi-línea y multi-producto, optimización del sistema productivo a través del algoritmo PSO, donde se realiza la optimización para cada función objetivo y para las dos funciones objetivo en conjunto, dada la incertidumbre presente en el equipo o la persona que tome la decisión y basada en sus preferencias de acuerdo con las características de las variables internas y externas del sistema productivo (Acosta, 2019) y finalmente la interpretación de resultados.

DESARROLLO

SISTEMA DE PRODUCCIÓN

Se propone un sistema productivo diseñado en un FMS (Sistema de Manufactura Flexible), considerando maquinaria de tecnología avanzada con el objeto de hacer frente al cambio del tipo de producto a través de la flexibilidad de las máquinas. El sistema tiene 4 líneas de procesamiento, cada línea puede tener hasta 6 estaciones de trabajo. Las líneas de procesamiento que no cuentan con el número máximo de estaciones de trabajo se consideran líneas extraordinarias donde su característica principal es su capacidad de producción, es de-

cir, procesan un número mayor de piezas en un tiempo determinado. La Figura 1 muestra la configuración del sistema de producción por línea.

Cada estación de trabajo realiza la misma operación para cada una de las líneas de producción, no obstante, las características de la maquinaria utilizada pueden variar en las diferentes líneas de producción para una estación de trabajo. Por lo tanto, la capacidad de producción puede ser distinta. La Tabla 1 muestra el tiempo de procesamiento de cada una de las líneas de producción para cada producto.

Con el propósito de evitar cuellos de botella y de mantener la asignación en la línea de producción a la que fue asignada, la secuencia se mantiene mientras sea

posible. En el supuesto de que la línea no contara con la estación de trabajo para continuar la secuencia de producción, se selecciona de forma aleatoria una de las líneas de producción que contenga la estación faltante de la línea asignada. Una vez ejecutada la acción de procesamiento en la estación de trabajo seleccionada, si es posible, la secuencia de procesamiento regresa a la línea de producción a la cual fue asignada inicialmente; de lo contrario, se selecciona la estación de trabajo siguiente de forma aleatoria.

Durante la secuencia de procesamiento existe la posibilidad de cambio de línea de producción, por lo tanto, existe un tiempo de traslado entre líneas, de almacén

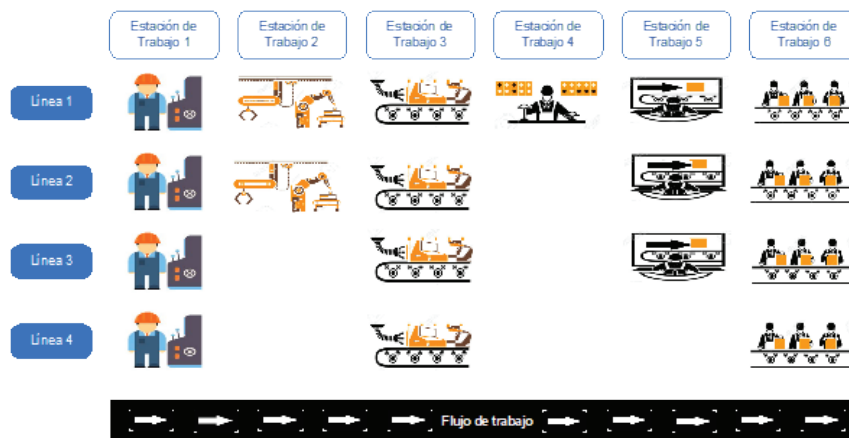


Figura 1. Sistema productivo

Tabla 1. Tiempo de procesamiento (minutos)

Línea de producción	Producto	Estación de trabajo 1	Estación de trabajo 2	Estación de trabajo 3	Estación de trabajo 4	Estación de trabajo 5	Estación de trabajo 6
Línea 1	A	10.5	15.3	15.7	5.4	10.4	5.3
	B	18.3	20.4	24.4	9.5	15.3	7.5
	C	15.2	24.6	20.2	8.6	14.7	6.6
	D	20.6	18.3	22.5	6.4	15.4	7.3
	E	9.7	14.2	18.7	5.7	10.8	5.6
Línea 2	A	9.1	12.1	13.4	-	8.1	5.3
	B	15.2	18.5	20.1	-	13.3	7.5
	C	12.7	20.8	22.8	-	12.6	6.6
	D	16.3	17.6	18.9	-	12.5	7.3
	E	8.7	12.5	17.5	-	9.9	5.6
Línea 3	A	6.6	-	10.3	-	8.7	5.3
	B	11.3	-	16.1	-	12.4	7.5
	C	10.1	-	14.5	-	10.6	6.6
	D	13.4	-	11.7	-	10.7	7.3
	E	5.5	-	9.8	-	8.8	5.6
Línea 4	A	5.6	-	8.4	-	-	5.3
	B	9.4	-	11.2	-	-	7.5
	C	9.3	-	10.1	-	-	6.6
	D	10.2	-	9.5	-	-	7.3
	E	5.4	-	8.7	-	-	5.6

a línea y de línea a almacén. Los tiempos se representan en la Tabla 2.

SIMULADOR

El simulador del sistema productivo calcula el tiempo total de procesamiento y el tiempo total de demora, considerando solo como entrada la asignación de lotes de producción a cada una de las líneas de procesamiento. La Figura 2 muestra las fases del proceso de simulación.

Es importante señalar que la simulación es una evaluación a través de la cual se pueden obtener respuestas o resultados acerca del comportamiento del sistema analizado, y donde el comportamiento de un modelo, es la relación de causa y efecto con las mismas o similares a las del sistema original (López *et al.*, 2019).

ENTRADA

La entrada del simulador consiste en asignar una orden de producción o lote de producción a una de las líneas del sistema productivo. El problema plantea la producción de 10 lotes de fabricación hasta con 5 productos diferentes. La Tabla 3 muestra el listado de lotes de producción y la cantidad de piezas por producto.

La asignación del número de lote a la línea de producción está representada por el vector entrada, de tamaño igual al número de lotes de producción donde cada uno de los elementos del vector corresponde por lo menos a una línea de producción. Las posiciones del vector hacen referencia al número de lote y el número asignado a cada posición indica la línea de producción a la que fue asignado dicho lote. Para que el vector se

considere completo debe contener todas las líneas de producción. La Figura 3 muestra el vector de entrada o vector de asignación.

El vector entrada hace referencia a los 10 lotes de producción de forma ordenada de izquierda a derecha y de menor a mayor, es decir 1, 2, 3... 10. Para cada lote se asigna la línea de producción entre [1,4], que llevará a cabo el procesamiento. Para que el vector entrada sea válido, debe contener las 4 líneas de producción.

INICIALIZACIÓN DE DATOS

La etapa de inicialización de datos requiere de cargar e inicializar todos los datos y variables relacionadas con el proceso de simulación, que implica los dos puntos siguientes:

1. Cargar los datos del tiempo de procesamiento (Tabla 1), el tiempo de traslado de los productos (Tabla 2) y el número de piezas de cada lote de producción (Tabla 3).
2. Inicializar las siguientes variables en 0: hora de llegada del lote producción a la estación de trabajo o almacén, hora de inicio del procesamiento del lote de producción, tiempo de procesamiento del lote de producción en cada estación de trabajo y el tiempo de transporte de cada lote de producción.

ASIGNACIÓN DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN

El vector entrada (Figura 3), muestra la asignación de la línea de procesamiento para cada lote de producción. Cada línea procesa el lote asignado de forma continua a las demás líneas en el orden que le fue asignado (lote 1,

Tabla 2. Tiempo de traslado (minutos)

	Almacén Materia Prima (M.P.)	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Almacén Producto Terminado (P.T.)
Almacén M.P.	0	1	1.2	1.4	1.6	20
Línea 1	1	0	3	5	9	2.5
Línea 2	1.2	3	0	3	5	3
Línea 3	1.4	5	3	0	3	3.5
Línea 4	1.6	9	5	3	0	4
Almacén P.T.	20	2.5	3	3.5	4	0

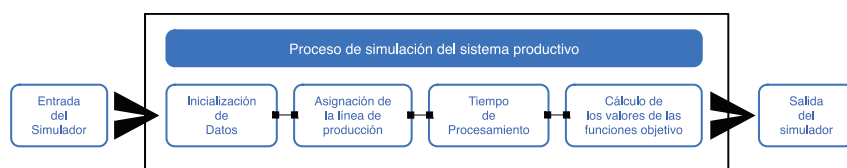


Figura 2. Fases de simulación del proceso productivo

Tabla 3. Lotes de producción

Núm. de lotes de producción	Piezas del producto A	Piezas del producto B	Piezas del producto C	Piezas del producto D	Piezas del producto E
Lote 1	1250	779	480	0	2450
Lote 2	800	1310	540	529	1890
Lote 3	930	1220	335	745	2100
Lote 4	1000	740	0	1260	1750
Lote 5	750	1045	0	1379	1520
Lote 6	0	459	670	980	1059
Lote 7	980	890	245	845	1450
Lote 8	745	467	689	654	1578
Lote 9	384	1130	523	930	1800
Lote 10	654	890	789	768	0

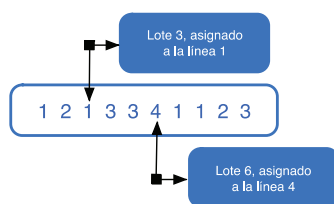


Figura 3. Vector de asignación

2, 3, ... 10). La secuencia de procesamiento está sujeta a las siguientes reglas:

1. Todos los productos de un mismo lote de producción son asignados a una misma línea de producción.
2. Si la línea de producción a la cual fue asignado el lote para su procesamiento no cuenta con todas las estaciones de trabajo, el lote pasará de forma aleatoria a otra línea que contenga la estación de trabajo, siempre y cuando se requiera para su procesamiento.
3. El lote debe ser procesado en las estaciones de trabajo de la línea de producción a la que fue asignado.

La Figura 4 muestra la asignación de lotes de producción a cada una de las líneas en forma continua, así como la secuencia en que serán procesados para cada línea de

procesamiento. Si la estación de trabajo 1 de las diferentes líneas de producción termina con el lote en proceso, continúa con el procesamiento del siguiente lote asignado a la línea de producción. Se muestra el flujo de procesamiento de la línea de producción número 4.

TIEMPO DE PROCESAMIENTO

Para cada lote de producción, el tiempo de procesamiento, transporte, demora, arribo, inicio y término en cada estación de trabajo se determinan de acuerdo con lo siguiente:

Tiempo de procesamiento y transporte: Para cada estación de trabajo se determina el tiempo de procesamiento de cada lote y el tiempo de transporte a su siguiente estación o almacén de producto terminado.

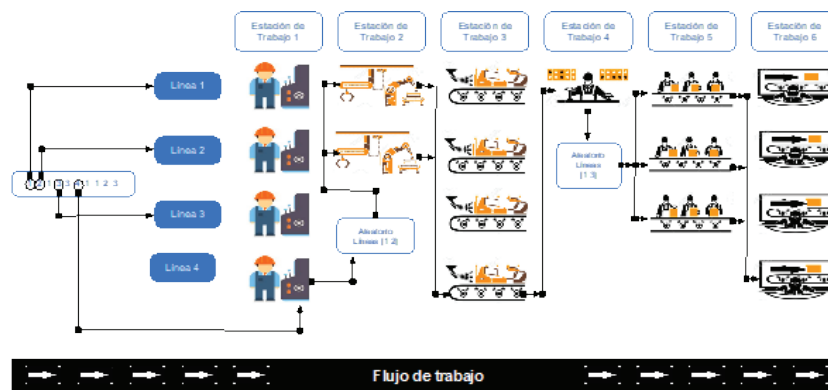


Figura 4. Asignación y flujo de procesamiento

$$Tp_{ij}^k = \frac{L_{ij}}{Tp_k} \quad (1)$$

Donde:

- i = Lotes de producción [1,n]
- n = Número de lotes de producción
- j = Productos [1,m]
- m = Número de productos
- k = Estación de trabajo [1,h]
- h = Número de estaciones de trabajo
- l = Líneas de producción [1,f]
- f = Número de líneas de producción
- b_{ij}^k = Lote de producción i del producto j en la estación de trabajo k
- u_{ij} = Lote de producción i del producto j
- c_{jk} = Producto j en la estación de trabajo k
- Tp_{ij}^k = Tiempo de procesamiento de b_{ij}^k
- L_{ij} = Número de piezas de u_{ij}
- Tp_k = Tiempo de proceso de c_{jk}

Tiempo de arribo: Para cada estación de trabajo, el tiempo de arribo se determina por los tiempos de procesamiento de las estaciones de trabajo anteriores, más los tiempos de transporte. Para determinar el tiempo de llegada a la estación de trabajo 1 se considera el tiempo de salida del almacén de materia prima más el tiempo de transporte a la estación de trabajo.

$$Ta_k = Ta_{k-1} + Tp_{ij}^{k-1} + Tt_{k-1}^k \quad (2)$$

Donde:

- Ta_k = Tiempo de arribo a la estación de trabajo k
- T_s = Tiempo en que sale la materia prima del almacén
- TT_{MP} = Tiempo de transporte de la materia prima a la línea de producción
- Ta_{k-1} = Tiempo de arribo a la estación de trabajo $k-1$. Cuando $k=1$, cuando $k = 1$, $Ta_{k-1} = T_s + TT_{MP}$
- Tp_{ij}^{k-1} = Tiempo de procesamiento de u_{ij} en la estación de trabajo $k-1$
- Tt_{k-1}^k = Tiempo de transporte de la estación de trabajo $k-1$ a la estación de trabajo k

Tiempo de inicio: Para cada estación de trabajo el tiempo de inicio será igual al tiempo de finalización del lote que se encuentre en proceso, si no hay lote en proceso entonces el tiempo de inicio será igual al tiempo de arribo.

$$\text{Si } Tp_{ij}^k > ta_k \quad (3)$$

$$Tl_k = Tp_{ij}^k$$

$$\text{Si } Tp_{ij}^k \leq ta_k$$

$$Tl_k = Ta_k \quad (4)$$

Donde:

Tl_k = Tiempo de inicio en la estación de trabajo k

Tiempo de demora: El tiempo que demora del producto j del lote producción i en ser procesado por la estación de trabajo k . Se determina realizando la diferencia del tiempo de inicio y el tiempo de arribo del producto a la estación de trabajo.

$$TD_k = Tl_k - Ta_k \quad (5)$$

Donde:

TD_k = Tiempo de demora en la estación de trabajo k

FUNCIONES OBJETIVO

Función objetivo 1: Tiempo total de procesamiento.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_i^n TAPT_i - TAMP_i \quad (6)$$

Donde:

$TAPT_i$ = Tiempo de llegada del lote i al almacén de producto terminado

$TAMP_i$ = Tiempo de salida del lote i del almacén de materia prima

Función objetivo 2: Tiempo total de demora.

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{k=1}^{k_m} TD \quad (7)$$

SALIDA

El valor de salida (tiempo total de procesamiento y tiempo total de demora) depende del vector entrada. La solución óptima será el vector entrada que minimice las funciones objetivo.

OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN

El método de optimización “Particle Swarm Optimization” también conocido por sus siglas en inglés como PSO, propuesto por Kennedy & Eberhart (1995), a grandes rasgos funciona a través de una población de partículas que operan en un espacio de búsqueda acotado. En cada iteración se obtienen nuevas posiciones para las partículas por medio de una velocidad que se determina, considerando la mejor posición global y la mejor posición actual de cada partícula. La calidad de la población se determina evaluando los individuos en la función objetivo cada vez que toman una nueva posición. La selección de los individuos de la población dependerá de los operadores del método, en cada iteración los elementos de la población comparten información, permitiendo acercarse con mayor o menor rapidez a la solución global del problema (Cuevas *et al.*, 2017). El uso del algoritmo PSO tiene la ventaja de no tomar en cuenta el gradiente del problema a optimizar, basándose directamente en la medida de aptitud en el proceso de optimización (Pedersen & Chipperfield, 2010). En la actualidad existen diferentes heurísticas como las que proponen Holland (1975) y Goldberg (1989) conocida como algoritmos genéticos; Dorigo *et al.* (2006) plantean el algoritmo de optimización basado en la colonia de hormigas, Lee & Geem (2004) presentan el algoritmo de optimización búsqueda de armonía, Karaboga & Basturk (2007) introduce el algoritmo de optimización llamado colonia de abejas artificiales, Yang (2009) proponen el algoritmo de optimización conocido como luciérnaga, Husseinzadeh (2011) implementa el algoritmo campeonato de liga, Eskandar *et al.* (2012) desarrollan el algoritmo ciclo del agua, Sadollah *et al.* (2013) plantean el algoritmo explosión de minas. De las heurísticas mencionadas, el algoritmo PSO ha sido mayormente utilizado por investigadores gracias a la facilidad de implementación y a su eficiencia en la solución de problemas complejos de optimización (Ben-Guedria, 2016). La Figura 5 muestra la metodología básica del PSO.

INICIALIZACIÓN DE LA POBLACIÓN Y LA VELOCIDAD

La población inicial está compuesta por 500 partículas (vector entrada), obtenidas de forma aleatoria y con las características siguientes:

- El número de elementos de cada vector entrada debe ser igual al número de lotes de producción.
- Los elementos de cada vector entrada están en el intervalo $[1, f]$ de números enteros.

- Cada vector entrada debe contener f líneas de producción.

Para la primera iteración la velocidad se inicializa con un valor igual a cero.

EVALUACIÓN DE LA POBLACIÓN EN LA FUNCIÓN OBJETIVO

La optimización de cada función objetivo se obtiene de forma independiente considerando que ambas tienen la misma relevancia en la toma de decisiones. Cada individuo de la población es evaluado para cada función objetivo, obteniendo de ambas el mejor valor global.

VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS

Para el cálculo de velocidades posteriores se utiliza la ecuación 8.

$$v^{t+1} = v^t + rand_1 (P - X^t) + rand_2 (G - X^t) \quad (8)$$

Donde:

- v^{t+1} = Velocidad en la iteración $t + 1$
- v^t = Velocidad en la iteración t

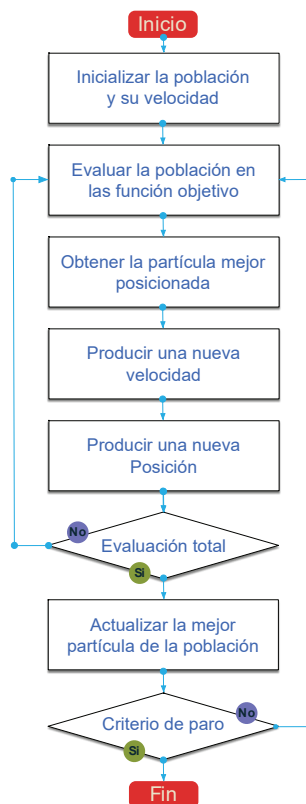


Figura 5. Diagrama de flujo del PSO convencional

X^t = Vector de posición de cada partícula
 P = Vector con las mejores posiciones actuales de cada partícula
 G = Mejor partícula actual de la población
 $rand_1$ y $rand_2$ = Números aleatorios en el rango [0,1]

NUEVA POSICIÓN DE LAS PARTÍCULAS

La nueva posición de las partículas se obtiene por la ecuación 9.

$$x^{t+1} = X^t + v^{t+1} \tag{9}$$

Donde:

x^{t+1} = Nuevas posiciones de las partículas

La partícula o vector entrada está conformado por valores enteros en el intervalo [1,f], la nueva posición tiene valores continuos, para obtener valores enteros se redondean a cero los valores decimales y se comprueba que los elementos se mantengan en el intervalo, de lo contrario serán sustituidos de forma aleatoria.

El algoritmo de optimización se mantiene hasta que se cumpla la condición de paro (número de iteraciones).

RESULTADOS

El simulador del sistema de producción se evalúa y optimiza para cada una de las funciones objetivo de forma independiente y en forma conjunta a través de pesos ponderados.

La función objetivo 1 y 2 se evalúan por separado en el PSO considerando 10, 15, 20 y 25 iteraciones, con 500, 400, 350 y 300 partículas, respectivamente. La solución óptima resultante en las 4 evaluaciones se representa en la Tabla 4.

La secuencia de estaciones de trabajo que siguió el sistema productivo para obtener los valores óptimos de las funciones objetivo 1 y 2, están presentes en el anexo, Tablas A.1 y A.2, respectivamente.

La Figura 6 muestra las 4 gráficas de optimización de las funciones objetivo considerando diferente número de iteraciones y de partículas. La gráfica A muestra los resultados de optimización considerando 500 partículas y 10 iteraciones, la gráfica B muestra los resultados de optimización considerando 400 partículas y 15 iteraciones, la gráfica C muestra los resultados de optimización considerando 300 partículas y 20 iteraciones y la gráfica D muestra los resultados de optimización considerando 300 partículas y 25 iteraciones.

Tabla 4. Solución óptima de la función objetivo 1 y 2

Solución óptima de la función objetivo 1 4 4 4 4 4 1 4 3 4 2 Tiempo total de procesamiento 97,741.1019 min	Solución óptima de la función objetivo 2 4 4 4 3 4 1 4 4 4 2 Tiempo total de demora 65,208.1802 min
--	---

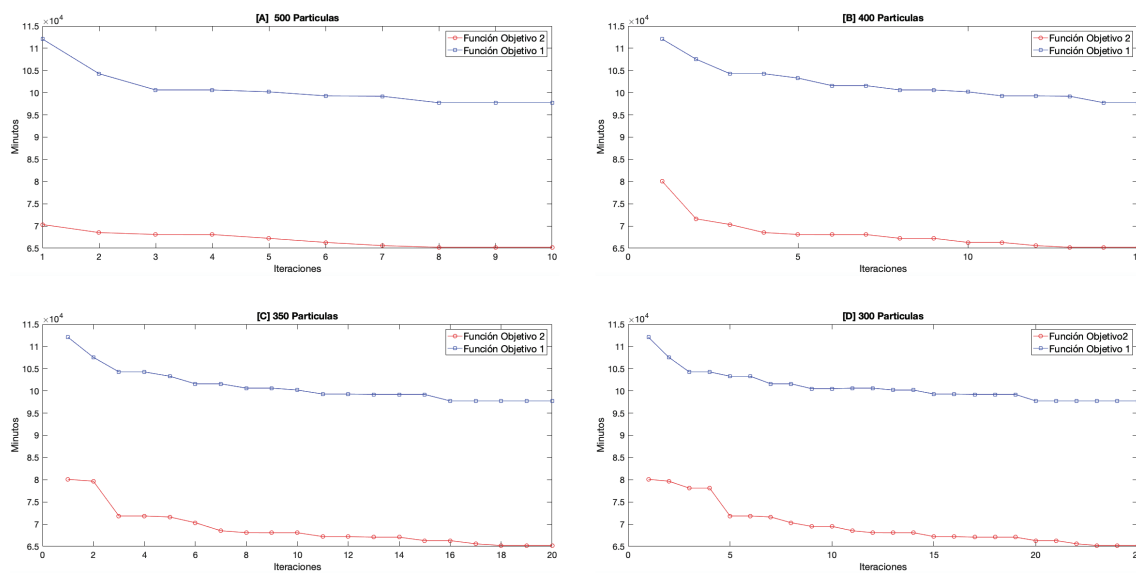


Figura 6. Resultados óptimos de la función objetivo 1 y 2

La Tabla 5 muestra las soluciones óptimas de la función objetivo 1 y 2 (pesos ponderados), considerando 500 partículas y 10 iteraciones.

Tabla 5. Solución óptima de la función objetivo 1 y 2 considerando pesos ponderados

Peso Objetivo 1	Solución	Tiempo total de procesamiento (min)	Tiempo total de demora (min)	Peso objetivo 2
90 %	4 4 4 4 3 4 2 1 4	99,563	67,886	10 %
80 %	4 4 4 4 3 2 4 4 4 1	100,460	68,340	20 %
70 %	4 4 4 4 3 1 4 4 4 2	100,160	68,020	30 %
60 %	4 4 3 4 4 1 4 4 4 2	101,460	69,310	40 %
50 %	4 4 4 4 4 2 3 4 1 4	100,680	68,870	50 %
40 %	4 4 4 4 4 2 4 1 3 4	99,713	67,829	60 %
30 %	4 4 4 4 4 2 4 1 4 3	102,630	70,660	70 %
20 %	4 4 4 4 4 1 3 4 4 2	100,180	68,050	80 %
10 %	4 4 4 4 4 3 4 1 4 2	101,480	69,490	90 %

La Figura 7 muestra la correlación que existe entre el tiempo total de procesamiento y el tiempo total de demora.

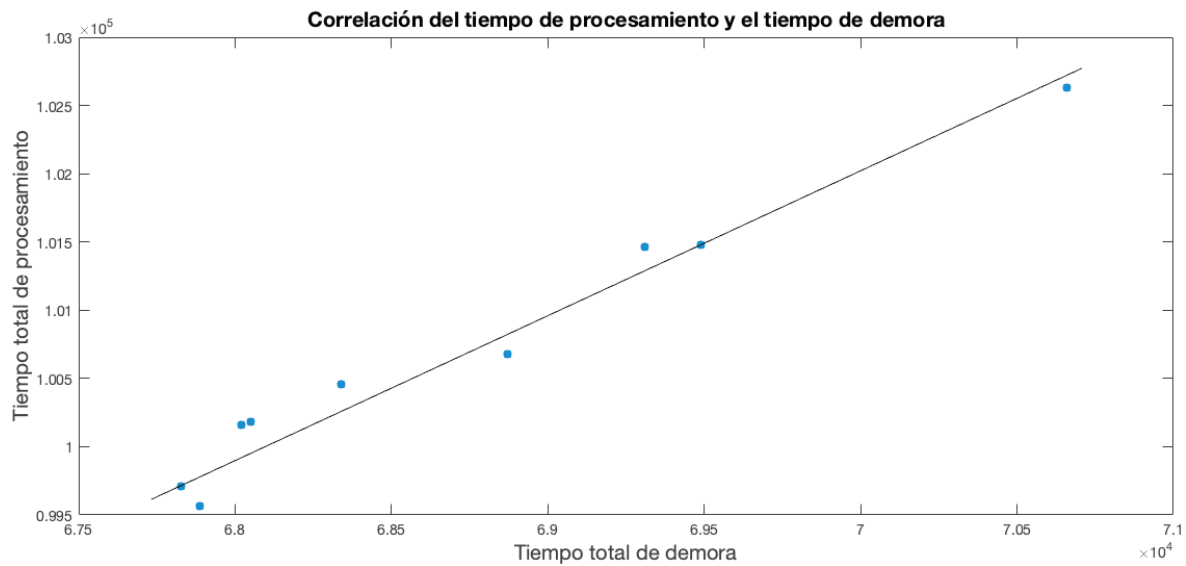


Figura 7. Correlación de la función objetivo 1 y 2

CONCLUSIONES

En la actualidad, la diversidad de productos mantiene los niveles competitividad, sin embargo, la asignación errónea de órdenes de producción en sistemas flexibles ocasiona tiempos de entrega fuera de las fechas establecidas, niveles de inventario mayores a los programados en la línea de producción, costos directos e indirectos por encima de lo planeado. El problema planteado muestra, a través del simulador, resultados con valores mucho mayores al valor de la solución óptima con tan

solo asignar un lote de producción a una línea diferente, de ahí la importancia de la planeación y programación de órdenes de producción. Hoy por hoy, un número importante de empresas realizan la asignación de órdenes de producción basados en la experiencia y en la intuición del equipo o persona encargada de tomar la decisión, a pesar de ello, la mayoría de las veces la decisión tomada no es óptima. Los problemas combinatorios suelen tener un espacio bastante grande de soluciones, donde seleccionar la solución óptima tiende a ser complejo y con tiempos de respuesta no favorables

para la industria. El número de soluciones a evaluar en el simulador dependerá de las combinaciones de asignación de lotes de producción a las líneas de fabricación, el problema considera 10 lotes, por lo tanto el número de combinaciones posibles (soluciones) es igual a 10!

El sistema de producción tiene un intervalo de variabilidad [0,3] % en el resultado final para una solución, esto se debe a la aleatoriedad que existe en la selección de la línea de producción. No obstante, el algoritmo de optimización mantiene la solución óptima como se observa en la Figura 6. Los resultados muestran correlación, la solución óptima de una de las funciones objetivo afecta al óptimo de la otra. Por lo tanto, la persona que tome la decisión de la selección de la solución del sistema de producción debe considerar priorizar una de las funciones objetivo.

Tomando en cuenta la prioridad de las funciones objetivo, se plantean 9 escenarios diferentes relacionados con pesos ponderados con variabilidad de 10 %. Los resultados muestran valores por encima de los valores óptimos. Estos resultados sirven de referencia para que el personal tome la decisión correcta de acuerdo con las circunstancias del sistema de producción.

El algoritmo de optimización PSO obtiene resultados favorables considerando un número de partícula y de iteraciones relativamente pequeño, el tiempo estimado en obtener el óptimo es de 10 s donde las características del sistema de computo utilizado son: Procesador i5, 4 MB de RAM y disco duro de 120 GB.

Como trabajo futuro, se propone evaluar al sistema de producción en algoritmos de optimización de nueva generación y multi-objetivo con el propósito de minimizar aún más los valores óptimos que hasta el momento se han obtenido, así como el intervalo de variabilidad de los valores de las funciones objetivo.

ANEXO

Tabla A.1 Secuencia de producción por lote (Función objetivo 1)

Núm. de lote	Estaciones de trabajo					
	1	2	3	4	5	6
Lote 1	4	2	4	1	1	4
Lote 2	4	1	4	1	2	4
Lote 3	4	1	4	1	2	4
Lote 4	4	2	4	1	1	4
Lote 5	4	1	4	1	1	4
Lote 6	1	1	1	1	1	1
Lote 7	4	2	4	1	3	4
Lote 8	3	1	3	1	3	3
Lote 9	4	1	4	1	3	4
Lote 10	2	2	2	1	2	2

Tabla A.2 Secuencia de producción por lote (Función objetivo 2)

Núm. de lote	Estaciones de trabajo					
	1	2	3	4	5	6
Lote 1	4	1	4	1	1	4
Lote 2	4	2	4	1	1	4
Lote 3	4	1	4	1	1	4
Lote 4	3	1	3	1	3	3
Lote 5	4	1	4	1	2	4
Lote 6	1	1	1	1	1	1
Lote 7	4	2	4	1	1	4
Lote 8	4	2	4	1	2	4
Lote 9	4	1	4	1	1	4
Lote 10	2	2	2	1	2	2

REFERENCIAS

Acosta-Flores, J.J. (2019). Algoritmo para analizar decisiones con objetivos múltiples bajo incertidumbre. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XX (1), 1-8.

Bellgran, M. & Säfsten, K. (2010). *Production development design and operation of production systems*, (Vol. 1). New York, EUA: Springer.

Ben-Guedria, N. (2016). Improved accelerated PSO algorithm for mechanical engineering optimization problems. *Applied Soft Computing*, 40, 455-467. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.048>

Chu, Y., You, F., Wassick, J.M. & Agarwal, A. (2015). Integrated planning and scheduling under production uncertainties: Bi-level model formulation and hybrid solution method. *Computers and Chemical Engineering*, 72, 255-272. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.02.023>

Cuevas-Jiménez, E.V., Osuna-Enciso, J.V., Oliva-Navarro, D.A. & Díaz-Cortés, M.A. (2017). *Optimización, algoritmos programados con MATLAB*, (1ª ed.). CDMX, México: Alfaomega.

Dorigo, M., Birattari, M. & Stützle, T. (2006). Ant colony optimization artificial ants as a computational intelligence technique. *IEEE Comput. Intell. Mag.*, I, 28-39.

Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A. & Hamdi, M. (2012). Water cycle algorithm a novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Comput. Struct.*, 110, 151-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.07.010>

Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*.

Guinet, A. (2001). Multi-site planning: A transshipment problem. *International journal of production economics*, 74 (1), 21-32. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00104-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00104-9)

Guo, Z., Wong, W., Li, Z. & Ren, P. (2013). Modeling and Pareto optimization of multi-objective order scheduling problems in production planning. *Computers & Industrial Engineering*, (64), 972-986. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.006>

- Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, Control, and artificial intelligence*. University of Michigan.
- Hoon-Kim, S. & Hoon-Lee, Y. (2016). Synchronised production planning and scheduling in semiconductor fabrication. *Computer and industrial engineering*, (96), 72-85.
- Husseinzadeh-Kashan, A. (2011). An efficient algorithm for constrained global optimization and application to mechanical engineering design: league championship algorithm (LCA). *Comput. Des.*, 43, 1769-1792. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2011.07.003>
- Józefowska, J. & Zimniak, A. (2008). Optimization tool for short-term production planning and scheduling. *International journal de production economics*, 112 (1), 109-120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.08.026>
- Karaboga, D. & Basturk, B. (2007). Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization. *LNAI*, 4529, 789-798.
- Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. En International Conference on Neural Networks. IV. Perth, Australia: IEEE.
- Lee, K. & Geem, Z. (2004). A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. *Comput. Struct.*, 82, 781-798.
- Leung, S.C., Tsang, S.O., Lung, W.N. & Wu, Y. (2017). A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment. *European journal of operational research*, 181 (1), 224-238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.011>
- López-Sánchez, A.Y., González-Lara, A.L. & Alcaraz-Corona, S. (2019). Simulación para la optimización de la producción de ejes en la línea de ensamblaje de una empresa de manufactura. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XX (1), 1-9. <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.005>
- Man, K., Tang, K., Kwong, S. & Ip, W. (2000). Genetic algorithm to production planning and scheduling problems for manufacturing systems. *Production Planning y control*, 11 (5), 443-458. <https://doi.org/10.1080/09537280050051942>
- Mori, J. & Mahalec, V. (2017). Planning and scheduling of steel plates production. Part II: Scheduling of continuous casting. *Computer and Chemical Engineering*, (101), 312-325. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.01.020>
- Pedersen, M. & Chipperfield, A. (2010). Simplifying Particle Swarm Optimization. *Applied Soft Computing*, 10, 618-628.
- Sadollah, A., Bahreininejad, A., Eskandar, H. & Hamdi, M. (2013). Mine blast algorithm: a new population based algorithm for solving constrained engineering optimization problems. *Appl. Soft Comput. J.*, 13, 2592-2612. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.11.026>
- Timpe, C. & Kallrath, J. (2000). Optimal planning in large multi-site production networks. *European journal of operational research*, 126 (2), 422-435. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00301-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00301-X)
- Yang, X. (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization. *Lect. Notes Comput. Sci. (Including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, 5792, 169-178.