



LA FORMACIÓN DE INGENIEROS:
UN COMPROMISO PARA EL
DESARROLLO Y LA SOSTENIBILIDAD

15 al 18
DE SEPTIEMBRE

20
20

www.acofi.edu.co/eiei2020

SECUENCIACIÓN FLOW SHOP CON TIEMPOS DE ALISTAMIENTO MEDIANTE ALGORITMO DE ENFRIAMIENTO SIMULADO

Orlando F. Gonzales Casallas, Laura M. Parra Gómez, Silvia J. Pinzón Castiblanco

**Universidad Pontificia Bolivariana
Bucaramanga, Colombia**

Resumen

El desarrollo de algoritmos de programación para problemas de secuenciación tipo Flow shop ha sido un tema de elevada importancia en el campo empresarial, en especial para la evolución de la industria 4.0. Por lo tanto, este trabajo de investigación pretende adaptar un modelo de optimización tipo Flow shop con tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia al algoritmo metaheurístico de enfriamiento simulado, mediante una instancia de prueba. Por consiguiente, se considera que la empresa Metalflex S.A.S posee un sistema de producción para diez referencias de productos, los cuales deben pasar por siete máquinas, bajo la misma secuencia de operaciones. Para ello, se dispone de una matriz de tiempos de procesamiento y una de alistamiento (en minutos), con el objetivo de lograr una secuenciación de todas las referencias de producto, de tal forma que se pueda minimizar el tiempo de terminación de todos los trabajos. El desarrollo de esta propuesta de solución se codificó en lenguaje de programación Visual Basic for Applications. Para la obtención de los resultados, se proponen tres escenarios con treinta (30) replicas cada uno; en donde cada escenario se modifican sus parámetros de entrada: niveles de temperatura, factor de enfriamiento y número de iteraciones. Permitiendo desarrollar un análisis correlacional de estas variables para conocer la relación entre ellas. Con base a esto, los tiempos de terminación promedio de las treinta (30) replicas en cada escenario fueron: 431.19, 436.44 y 426.27 respectivamente. A partir de esto, se observa que el tercer escenario es el más favorable, ya que genera las mejores soluciones en comparación a los otros, y con un tiempo computacional razonable. Por lo tanto, la empresa Metalflex S.A.S debería utilizar la secuenciación que se propone para que alcance el tiempo de terminación indicado.

Palabras clave: flow-shop; enfriamiento simulado; tiempo de terminación

Abstract

The development of programming algorithms for Flow shop scheduling problems has been a major issue in the business field, especially to the 4.0 industry's evolution. Therefore, this research paper aims to adapt a Flow shop optimization model with sequence-dependent setup times to the Simulated annealing metaheuristic algorithm, through a test instance. Consequently, Metalflex S.A.S is considered to have a production system for ten product references, which must go through seven machines, under the same workflow. To this effect, there is a processing and setup times' matrix (in minutes) available, aiming to achieve a schedule for all product references, minimizing the completion time or makespan. This solution proposal's development was codified in Visual Basic for Applications programming language. For the results, 30 replicates are proposed for each scenario, modifying its input parameters: temperature levels, cooling factor and number of iterations. It allows to perform a correlational analysis of these variables to identify the relations between them. On that basis, the average makespan per scenario were: 431.19, 436.44 and 426.27, respectively. Of the above, it can be said that the third scenario is the most favorable, since it leads to the best solutions in a reasonable computational time. As a result, Metalflex S.A.S should implement the proposed job schedule, so that it reaches the indicated completion time.

Keywords: *flow-shop; simulated annealing; makespan*

1. Introducción

En los procesos de aprendizaje y desarrollo de competencias analíticas, así como la interpretación y desarrollo de procedimientos heurísticos en problemas industriales, la Universidad Pontificia Bolivariana le apuesta al desarrollo de temáticas de fundamentos de metaheurística para que los futuros profesionales de la Ingeniería Industrial puedan abordar procedimientos de solución en el contexto de la Inteligencia Artificial y la Industria 4.0. Por tanto, este artículo de investigación se focaliza en el desarrollo de un caso de estudio referente al problema de un sistema de producción bajo un ambiente tipo Flow shop considerando el análisis restrictivo de tiempos de alistamiento de los productos dependientes de la secuencia. Para esto se propone una adaptación de un modelo de optimización tipo Flow shop con tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia, donde se procede con el análisis de la estructura matemática con el propósito de adaptar el algoritmo metaheurístico conocido como enfriamiento simulado. El procedimiento de mejoramiento de solución con el algoritmo metaheurístico propuesto, se basa en una búsqueda estocástica para la construcción de nuevas soluciones para el problema referente a la minimización del tiempo de terminación de todos los trabajos programados en el sistema de producción. El desarrollo de esta propuesta de solución se codificó en lenguaje de programación Visual Basic for Applications, el cual permite desarrollar un análisis correlacional, de tal forma que se pueda identificar la relación entre los valores paramétricos de la metaheurística asociados al nivel de temperatura, factor de enfriamiento e iteraciones. El caso de estudio considera la secuenciación de operaciones de diez referencias de productos en un sistema de producción con siete máquinas que trabajan en forma secuencial. Los resultados obtenidos, indican que el procedimiento metaheurístico propuesto permite obtener soluciones en un tiempo computacional razonable; así como la posibilidad de extender la utilización de esta herramienta en otros sistemas productos; por tanto, la importancia

de que los futuros Ingenieros Industriales pueda conocer y diseñar propuestas basadas en procedimientos analíticos para contribuir en la toma de decisiones asertivas en las organizaciones.

2. Secuenciación de operaciones

En diferentes ámbitos tales como el comercio, las finanzas, la producción, los servicios de salud, entre otros; es posible encontrar situaciones dónde es necesario asignar ciertas tareas o trabajos a un determinado número de operadores, ya sean máquinas o personas, que las ejecuten de la mejor manera, teniendo en cuenta los recursos disponibles (López de Pablo D. A., 2009). Según (Baker & Trietsch, 2009), "scheduling" -o en español, programación- es tradicionalmente la asignación de máquinas o procesadores, a lo largo del tiempo, para la ejecución de un grupo de tareas. Adicionalmente, (López de Pablo D. A., 2009) establece que, dentro de la programación de producción, las máquinas no pueden ejecutar de forma simultánea varias tareas; así como se debe establecer que una tarea es asignada a una sola máquina.

La complejidad del modelo varía según sus características. Cuando la instancia del problema es determinística, los problemas de programación de trabajos son modelos de optimización combinatoria, difíciles de resolver. Por otra parte, se habla de modelo estocástico cuando existe incertidumbre con los datos y presentan distribuciones probabilísticas. En (López de Pablo D. A., 2009), se afirma que un problema de programación converge rápidamente a la solución a través de un algoritmo con tiempo de ejecución polinomial. Cuando este tiempo no es polinomial, se denomina NP. Para estos, se debe hacer uso de otros métodos existentes de solución, como las heurísticas, que no proporcionan la solución óptima, pero pueden obtener una solución cercana al óptimo en un tiempo computacional razonable.

El abordaje de los problemas de secuenciación se basa en la identificación de la configuración del sistema de producción. De acuerdo con (Pinedo, 2000), los problemas de secuenciación se pueden clasificar según la naturaleza del ambiente de manufactura. Si se trabaja con una sola máquina -single machine-, si se dispone de un conjunto de máquinas que procesan de forma simultánea las tareas -parallel machines-, cuando se maneja un número de máquinas para que en forma secuencial obtengan el producto terminado -Flow shop-, también el caso en que los trabajos no pasan por la misma secuencia de operaciones -job shop-, o bien sistemas de manufactura que pueden manejar las máquinas sin ningún orden establecido -open shop-.

En este artículo se aborda el estudio de un sistema de producción bajo un ambiente de producción tipo Flow shop, de tal forma que se pueda estudiar su estructura restrictiva -asignación de tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia-, de tal forma que permita la adaptación de un algoritmo metaheurístico de enfriamiento simulado para minimizar el tiempo de terminación de todos los trabajos. Por tanto, es importante conocer los aspectos o características que conforman la dinámica de un ambiente tipo Flow shop.

2.1. Flow-shop scheduling:

La temática Flowshop fue iniciada por Johnson (1954) y Jackson (1955). El trabajo de Smith estableció la minimización del tiempo promedio de flujo de los trabajos y la minimización de tiempos de terminación con máquinas en paralelo McNaughton (1959). Con respecto al tema

de tiempos de alistamiento se establecen como criterio de optimización el mínimo número de trabajos tardíos de Moore y Hodgson en 1968, la minimización del Makespan con Muritz y Hoffman en 1969-1970 (López de Pablo D. A., 2009). Por otro lado, el estudio por Allahverdi, Gupta y Aldowaisan establecen problemas dinámicos y estocásticos en diferentes entornos de taller máquinas individuales, paralelas, taller de flujo y de trabajo); y para el año 2000 llegarían Cheng, Gupta y Wang quienes se enfocarían en los problemas de taller de flujo, para que en ese mismo año Potts y Kovaly dieran origen al procesamiento por lotes. (Allahverdi, Cheng, Ng, & Kovalyov, 2006)

Flow-shop es una configuración productiva compuesta por un conjunto ordenado de procesadores organizados en serie, a través del cual, el trabajo fluye desde el primer procesador, continuando a los intermedios, hasta llegar al procesador final. En este modelo, existen N número de máquinas, por lo cual, el trabajo a desarrollar se divide en N operaciones, cada una de las cuales se ejecuta en una máquina secuencial diferente. Ver [Fig. 1].



Fig. 1. Flujo de trabajo en Flow-shop. Fuente: Autores, 2020.

Los supuesto del problema flow shop, según Panneerselvam (2012) son: disponer de varias operaciones y cada operación debe ser procesada en una máquina; los tiempos de alistamiento son independientes de la secuencia; se conoce las condiciones de trabajo con anticipación; las máquinas están disponibles en todo momento y; cada operación es procesada en la máquina sin interrupción. De acuerdo con Lenstra et al (1977), en un problema Flow-shop, el número de máquinas N es una variable determinante para clasificar el problema como NP-complete o como NP-hard. Por otra parte, en (Garey, Johnson, & Sethi, 1976), se demuestra la condición NP-complete para un ambiente tipo Flow shop con 3 máquinas. Esto infiere que se puede diseñar varios modelos para el problema.

En esta investigación se propone un modelo de optimización binario, basado en la estructura de asignación de Wilson (1989); así como una estructura binaria de evaluación de posición de operaciones, basada en modelos de almacenamiento (Gonzalez, Suárez, & Gómez, 2019). Las variables para considerar son las siguiente: C_{max} , tiempo de terminación de los trabajos, x_{ij} , variable binaria de asignación de la operación i a la máquina j, $y_{ip|j}$: variable binaria de asignación entre las operaciones i,l en las máquinas p,j. Como parámetros del modelo se considera ρ_{ik} , el tiempo requerido por la operación i en la máquina k, S_{il} , tiempo de alistamiento entre las operaciones i,l, y C_{jk} , tiempo de disponibilidad en la posición j del trabajo k. El tiempo total de procesar todos los trabajos, se determina en la última máquina del sistema, tal como se presenta en la expresión (1)

$$\min C_{max} = C_{NM} + \sum_{i=1}^N \left[\rho_{iN} x_{iN} + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^N S_{il} y_{i(N-1)lN} \right] \quad (1)$$

Se considera la asignación de las posiciones de trabajo y disponibilidad de las maquinas (2) y (3). Adicionalmente, se debe realizar una asignación de secuencia entre dos trabajos (4), permitiendo que la variable binaria “y” para establecer el tiempo de alistamiento dependiendo de la secuencia de los trabajos. Para evitar que se genere repetición de trabajos o posiciones, la expresión (5) relaciona las dos variables de decisión. Para la disponibilidad de las máquinas se establece en (6), (7) y (8)- según el trabajo a procesar; finalmente, se debe relacionar el tiempo de alistamiento con la variable asignación binaria - ecuaciones (9), (10) y (11)-. (Gonzalez, Suárez, & Gómez, 2019).

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \text{trabajos} \quad (2) \quad \sum_{i=1}^N x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \text{posición} \quad (3) \quad \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{j>1}^N y_{iplj} = N - 1 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & x_{ip} \geq y_{iplj} \quad \forall i, l \in \text{trabajos} \mid i \neq l \\ & x_{lj} \geq y_{iplj} \quad \forall j, p \in \text{posición} \\ & x_{ip} + x_{lj} - y_{iplj} \leq 1 \quad \forall j, p \mid p = j - 1 \wedge j > 1 \end{aligned} \quad (5) \quad C_{j+1,k} \geq C_{jk} + \sum_{i=1}^N \rho_{ik} x_{ij} \quad \forall j \in \text{posición} \mid j = 1 \quad (7)$$

$$C_{j+1,k} = C_{jk} + \sum_{i=1}^N \rho_{ik} x_{ij} \quad \forall j \in \text{posición} \mid j = 1 \quad (6) \quad C_{j+1,k} = C_{jk} + \sum_{i=1}^N \rho_{ik} x_{ij} \quad \forall j \in \text{posición} \mid j = 1 \quad (8)$$

$$C_{j+1,k} = C_{jk} + \sum_{i=1}^N \left[\rho_{ik} x_{ij} + \sum_{l=1}^N S_{il} y_{iplj} \right] \quad \forall j, p \in \text{posición} \mid p = j - 1 \wedge 1 < j < N \quad (9)$$

$$\forall k \in \text{máquinas} \mid k = 1$$

$$C_{j+1,k} \geq C_{jk} + \sum_{i=1}^N \left[\rho_{ik} x_{ij} + \sum_{l=1}^N S_{il} y_{iplj} \right] \quad \forall j, p \in \text{posición} \mid p = j - 1 \wedge 1 < j < N \quad (10)$$

$$\forall k \in \text{máquinas} \mid k > 1$$

$$C_{j+1,k} = C_{jk} + \sum_{i=1}^N \left[\rho_{ik} x_{ij} + \sum_{l=1}^N S_{il} y_{iplj} \right] \quad \forall j, p \in \text{posición} \mid p = j - 1 \wedge 1 < j \leq N \quad (11)$$

$$\forall k \in \text{máquinas} \mid k < M$$

3. Algoritmo de enfriamiento simulado

El Enfriamiento Simulado -SA- es un método de optimización basado en procesos de templado de metales. Este proceso consiste de tres fases (ITESM, 2008). Ver [Fig.2]:

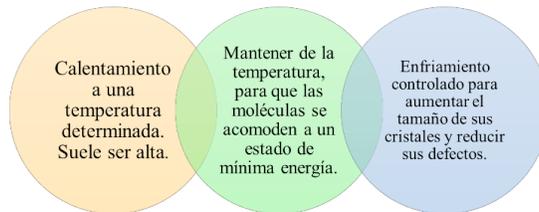


Fig. 2. Fases del proceso de templado de metales. Fuente: Autores, 2020.

Esta técnica se fundamenta en el proceso de templado de metales y en el algoritmo de Metrópolis, Metrópolis et al (1953). La estructura general del algoritmo se estableció en el trabajo de Kirkpatrick et al (1983). El algoritmo requiere definir una temperatura máxima, el vector de solución inicial para cada partícula y la función objetivo a minimizar o maximizar $f(x_i)$, según la situación. Se inicia generando una solución inicial aleatoria x_i . Cada vez que se ajusta la temperatura, las partículas cambian de energía -función objetivo-, pero solo es aceptada si la diferencia del estado

de energía entre la solución anterior y actual es negativa, de acuerdo con el criterio de Metrópolis – procedimiento estocástico que evalúa la función objetivo-. Una vez evaluado el cambio energético de todas las partículas, el algoritmo selecciona la solución con mejor cambio energético $f(x_i^*)$. Posteriormente, el algoritmo debe ajustar la temperatura y evaluar el cambio energético en el sistema. Al llegar a la temperatura final, según Rao (2009) el algoritmo reporta la mejor solución x_i^* asociada al mejor cambio energético del sistema.

4. Adaptación del algoritmo para el problema Flow Shop con tiempo de alistamiento

El caso de estudio se basa en la empresa Metalflex S.A.S, la cual, cuenta con un sistema de producción de siete procesos para diez tipos de láminas de acero, los cuales pasan por la misma secuencia de operaciones. Se dispone de la información de los tiempos de procesamiento y alistamiento (en minutos). El objetivo es lograr planificar la producción de todas las referencias de producto, de tal forma que se pueda minimizar el tiempo de terminación de todos los trabajos. Para ello, se codificó un programa a través del lenguaje de programación Visual Basic for Applications; el cual contiene cuatro módulos. Ver [Fig.4].

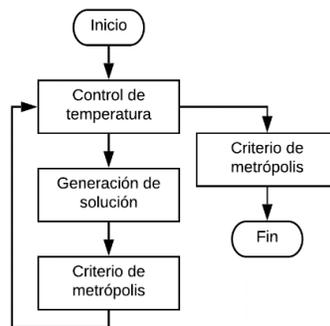


Fig. 4. Fases del proceso de templado de metales. Fuente: Autores, 2020.

En el módulo Control de temperatura se inicia con la definición y lectura de los parámetros de entrada y las variables de decisión (el número de trabajos, máquinas y posiciones), tiempos de alistamiento y procesamiento. Este módulo permite conectar los demás objetos o módulos de algoritmo. Una vez que se establecen los valores iniciales en el módulo de control de temperatura, el módulo Generación de solución se encarga de obtener las soluciones -estados de energía-, basado en un criterio estocástico asociado a las posiciones de la representación de la solución. Con esto en mente, el programa guarda las soluciones para que el módulo Criterio metrópolis se encarga de evaluar la calidad de la solución -función objetivo-, de tal forma que utilizando un proceso estocástico -distribución de energía de Boltzmann- se acepte una mejor o peor solución; esto permite la diversificación de soluciones en el algoritmo. Finalmente, el módulo Mejor solución se encarga de presentar la solución factible adecuada según la configuración del algoritmo propuesto.

5. Resultado
6. s computaciones

El algoritmo fue codificado en lenguaje de programación Visual Basic for Applications y ejecutado en un portátil DESKTOP-JPST3K9 con procesador Intel(R) Core (TM) i7-6500U CPU @ 2.50GHz 2.59GHz. Se establecen tres (3) escenarios, donde se disponen diferentes valores para los parámetros del algoritmo, Ver [TABLA I]. Por otro lado, el número de ciclos varía en cada escenario, según el factor de enfriamiento. Se establecen treinta (30) réplicas para cada escenario, obteniendo un C_{max} promedio y el tiempo computacional requerido -segundos-. El número de trabajos y el número de máquinas se mantienen constantes, como se observa en [TABLA II]. A partir de los resultados, se construyen los histogramas para los tres escenarios propuestos [Fig. 5]. Para el escenario uno, el makespan de mayor frecuencia se encuentra en el intervalo de 427.5 y 432.5 minutos. En el escenario 2, la mayor frecuencia de solución se presenta en el intervalo de 432.5 a 437.5 minutos. Finalmente, para el escenario 3, la mayor frecuencia se presenta en el intervalo de 427.5 a 432.5 minutos. Por tanto, el ajuste paramétrico indica que la mejor solución está en un intervalo de 427.5 minutos a 432.5 minutos; lo que indica que existe un nivel de precisión en la calidad de solución del algoritmo propuesto.

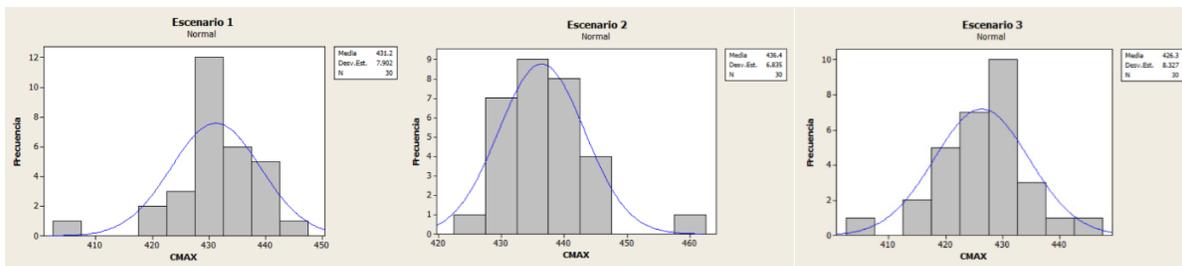


Fig. 5. Histogramas de los escenarios. Fuente: Autores, 2020.

TABLA I.
RESULTADOS DE ESCENARIOS PROPUESTOS

PARÁMETROS	ESCENARIOS		
	1	2	3
Temperatura inicial	110	100	125
Temperatura final	20	10	9
Factor enfriamiento	0.94	0.82	0.92
Iteraciones	10	5	7
Número de ciclos	28	12	32
Tiempo computacional	0.577	0.449	0.578
Cmax promedio	431.19	436.44	426.27

TABLA II.
PARÁMETROS QUE SE MANTIENEN CONSTANTES

Posiciones en secuencia	10
Trabajos	10
Máquinas	7

Fuente: Autores, 2020.

Fuente: Autores, 2020.

Se procede a identificar los tres tiempos de terminación de procesamiento de los trabajos -o C_{max} - por escenario. En la [TABLA III], el escenario tres genera el mínimo tiempo de terminación de



procesamiento obtenido en una réplica, siendo 404.1 minutos y, a su vez, el C_{max} promedio más bajo de los escenarios, con valor de 426.27 minutos. Por tanto, los parámetros del algoritmo para el escenario 3, son los adecuados para la instancia del problema. La [TABLA IV] se presenta la representación de la solución asociada al escenario 3.

**TABLA III.
TIEMPOS DE TERMINACIÓN MÍNIMOS POR ESCENARIO**

VALORES MÍN. POR ESCENARIO				Cmax prom
1	405.6	417.7	420	431.19
2	426.8	427.9	428.8	436.44
3	404.1	413.5	413.7	426.27

Fuente: Autores, 2020.

**TABLA IV.
SECUENCIA DE TRABAJOS PARA LA RÉPLICA CON CMAX MÍNIMO**

SECUENCIA DE TRABAJOS										
Tiempo Total	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
404.1	3	1	6	2	9	4	5	7	8	10

Fuente: Autores, 2020.

Se realiza un análisis correlacional para medir la fuerza y dirección de asociación entre los parámetros del algoritmo, a través del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson y Valor P en el software Minitab versión 15, con base en los resultados obtenidos. Se estima la influencia entre cada parámetro del algoritmo, así como su influencia sobre la respuesta $-C_{max}$. En primera instancia, se destaca la relación entre la temperatura máxima y mínima, lo que supone relaciones positivas moderadas entre estas. Así como las iteraciones frente a la temperatura mínima y el factor de enfriamiento. Lo anterior infiere que los cambios de valor de correlación entre la combinación de parámetros, basado en nivel de significancia del 5%, no tienen una relación lineal entre ellas, pero si puede existir una relación conjunta que logra un comportamiento significativo en la calidad de la solución, tal como se evidenció en el escenario 3 para el problema Flow Shop.

7. Conclusiones

Con base en los resultados, el escenario tres es el más favorable al obtener el mejor valor objetivo en un tiempo computacional razonable. Por tanto, para la empresa Metallflex S.A.S sería conveniente utilizar los valores paramétricos propuestos en este escenario. En relación a los histogramas expuestos, se evidencia precisión en el mode.

lo, ya que cuenta con una mayor concentración de los datos en el rango de 427.5 a 432.5 minutos para los tres escenarios propuestos. Adicionalmente, la adaptación de un algoritmo metaheurístico en problemas de secuenciación, requiere de un análisis paramétrico para mejorar la calidad de solución -mayor incidencia de temperatura inicial y factor de enfriamiento-. Con respecto a la codificación del algoritmo, se sugiere la utilización de módulos para facilitar la adaptación del



algoritmo metaheurístico. Finalmente, estos procedimientos analíticos permiten construir herramientas de información para que las empresas evalúen alternativas de solución en sistemas de producción.

8. Referencias

- Allahverdi, A., Cheng, T. C., Ng, C. T., & Kovalyov, M. Y. (13 de noviembre de 2006). A Survey of Scheduling Problems with Setup Times or Costs. *European Journal of Operational Research*.
- Baker, K. R., & Trietsch, D. (2009). *Principles of Sequencing and Scheduling*. Wiley.
- Farahmand-Mehr, M., Fattahi, P., Kazemi, M., Zarei, H., & Piri, A. (2014). An efficient genetic algorithm for a hybrid flow shop scheduling problem with time lags and sequence-dependent setup time. *EDP Sciences*, 1(21).
- Ferrero, A., Rossit, D., Toncovich, A., & Frutos, M. (2016). Aplicación de técnicas de subloteo a un sistema productivo flow-shop que cuenta con una máquina con tiempos de producción independientes del tamaño de sublote. *XXIV Jornadas Jóvenes Investigadores AUGM*. San Pablo.
- Garey, M., Johnson, D., & Sethi, R. (1976). The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1.
- Gonzalez, O., Suárez, E., & Gómez, B. (2019). Mejoramiento de la logística de almacenamiento en el Centro de Manejo Integral de Muestras del instituto Colombiano de Petróleos mediante algoritmo Híbrido de Enjambre de Partículas y bin-packing. *International Congress of Industrial Engineering (ICIE)*. Bucaramanga.
- ITESM. (18 de noviembre de 2008). Recuperado el 13 de marzo de 2020, de <https://www.mty.itesm.mx/decic/deptos/m/ma00-130/lecturas/m130-19.pdf>
- Jiménez Morales, Á. P. (2012). *Solución del problema de programación de Flow-Shop Flexible empleando el algoritmo genético de Chu-Beasley*. Pereira.
- Johnson, S. (1954). Optimal two- and three-stage production schedules. *Naval Res. and Logistics Quart*, 61-68.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., & Vecchi, M. (1983). Optimization by Simulated Annealing .
- Lenstra, J., Rinnooy Kan, A., & Brucker, P. (1977). Complexity of machine scheduling problems.
- López de Pablo, D. A. (2009). On scheduling model: an overview. *International Conference on Computers & Industrial Engineering*.
- López de Pablo, D. (s.f.). ON SCHEDULING MODELS. *Universidad de La Laguna*.
- Mellado Silva, R. A. (2014). *Aplicación del problema Flow-Shop Scheduling a la programación de reparación de equipos médicos*. Valparaíso.
- Metrópolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., & Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines.
- Panneerselvam, R. (2012). *Production and Operations Management*. PHI learning Pvt. Ltd.
- Pinedo, M. L. (2000). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. New York: Springer.
- Rao, S. S. (2009). Simulated Annealing. En *Engineering Optimization Theory and Practice* (págs. 702-706). New Jersey: Wiley.

- Wilson, J. M. (1989). Alternative Formulations of a Flow-shop Scheduling Problem. *Journal of Operational Research Society*, 40(4), 395-399.

Sobre los autores

- **Orlando F. Gonzales Casallas:** Ingeniero Industrial. Especialista en Ingeniería Electrónica. Máster en Ingeniería Industrial. Profesor asociado. orlando.gonzalez@upb.edu.co.
- **Laura M. Parra Gómez:** Estudiante de Ingeniería Industrial. laura.parra.2015@upb.edu.co.
- **Silvia J. Pinzón Castiblanco:** Estudiante de Ingeniería Industrial. silvia.pinzon.2015@upb.edu.co.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2020 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)