



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

15 al 18
DE SEPTIEMBRE

20
20

www.acofi.edu.co/eiei2020

MEJORAMIENTO DE RUTAS DE REPARTO Y SECUENCIACIÓN DE OPERACIONES DE LA EMPRESA HARINAS SAN MARTÍN CON HEURÍSTICA CLARKE-WRIGHT

Juan David Tarazona Barragán, Orlando Federico González Casallas, Lady Karina Buitrago Portilla, Andrés Felipe Muñoz Buenahora, Silvia Alejandra Pineda Villamizar

**Universidad Pontificia Bolivariana
Bucaramanga, Colombia**

Resumen

En el proceso logístico integrado de las organizaciones, se debe considerar la unificación de información para la sincronización de operaciones. En el caso de sistemas productivos, el estudio de secuenciación de operaciones de manufactura permite conocer la cantidad de producto terminado que debe ser distribuido a los diferentes clientes que maneja una organización. La interrelación de la logística de producción y logística de transporte es un aspecto prioritario para el caso de una empresa dedicada a la producción y distribución de granos y harinas, considerada como caso de estudio. En este artículo de investigación, se procede con un proceso de simulación de eventos discretos, considerando la integración de un procedimiento heurístico asociado al problema de secuenciación de operaciones en un ambiente de producción tipo flowshop, así como un procedimiento heurístico asociado al problema del agente viajero. Inicialmente, se procede con el análisis de información para la adaptación de un procedimiento heurísticos asociado al problema de secuenciación de producción tipo flowshop, para obtener la cantidad de referencias de productos en el menor tiempo posible; con esta información se procede con la determinación de la cantidad de productos que se deben distribuir a los clientes de la empresa, por lo que se desarrolla un procedimiento heurísticos de distribución de mercancías conocido como el modelo Clark and Wright que se considera para obtener soluciones factibles en el problema de ruteos de vehículos. El desarrollo de este procedimiento heurístico integrado se ejecutó en el lenguaje de programación Visual Basic. En el caso de estudio de la empresa productora y distribuidora de granos y harinas, se consideró la distribución de tres referencias de producto a los 24 clientes que dispone la empresa. El desarrollo de esta propuesta se solución permitió obtener resultados

asociados al mejoramiento de la planificación detallada de la producción, así como la configuración de reparto de productos a los clientes de la empresa; por tanto, los procedimientos heurísticos y herramientas computacionales permite un mejor proceso de planificación y análisis en las operaciones productivos y logísticas de las pequeñas y medianas industrias.

Palabras clave: algoritmo clarke-wright; flowshop; problema del agente viajero

Abstract

The unification of information for the analysis of operations should be considered in the integrated logistics process of companies. In the case of productive systems, the study of the sequencing of manufacturing operations allows us to know the quantity of finished product that must be distributed to the different clients that manage a company. The interrelation of production and transport logistics is a priority aspect in the case of a company dedicated to the production and distribution of grains and flours, considered as a case study. In this research article, a discrete event simulation process is proceed to identify the integration of a heuristic procedure associated with the problem of sequencing operations in a flowshop-type production environment, as well as a heuristic procedure associated with the traveling salesman problem. Initially, the analysis of information to adapt a heuristic procedure associated with the flowshop-type production sequencing problem is carried out with the aim to obtain the number of product references in the shortest possible time; This information will proceed with the determination of the quantity of products that must be distributed to the company's clients, therefore a heuristic procedure for the distribution of merchandise known as the Clark and Wright model is developed, which is considered to obtain feasible solutions in the vehicle routing problem. The development of this integrated heuristic procedure was executed in the Visual Basic programming language. In the case study of the company that produces and distributes grains and flours, consider the distribution of three product references to the 24 clients that the company has. The development of this solution proposal allowed to obtain results associated to the improvement of the specified planning of the production, as well as the configuration of the distribution of products to the clients of the company. Therefore, heuristic procedures and computational tools allow a better planning and analysis process in the productive and logistical operations of small and medium industries.

Keywords: clarke-wright algorithm; flowshop; travelling salesman problem

1. Introducción

Para una empresa dedicada a la producción y comercialización de alimentos agrícolas, es indispensable tener un orden en la elaboración de sus productos, debido a que tiene una fuerte incidencia en el aprovechamiento de la capacidad instalada, y puede influir en el cumplimiento de los compromisos que ha adquirido la empresa con los clientes (Gómez Gasquet, 2010). Además, permite reducir los tiempos de alistamiento de las distintas referencias y en efecto el tiempo de ciclo.

De igual manera, es importante contar con un sistema de ruteo aproximado; pues se observa en las empresas, que las entregas a tiempo, disminución de costos y reducción de distancias, son algunos de los aspectos fundamentales, para asegurar que dichas empresas mantengan las líneas de distribución de sus productos en una posición competitiva dentro del mercado (Roldán Reyes, Moras Sánchez, & Aguilar Lasserre, 2007).

En este caso de estudio, se plantea aplicar el algoritmo de Clarke and Wright, para proporcionar una ruta de distribución adecuada de la empresa Harinas San Martin, así como la adaptación del mismo algoritmo para un problema de secuenciación de operaciones tipo Flow-shop, que permita encontrar un orden de producción adecuado, disminuyendo tiempos y optimizando recursos dentro del proceso productivo, esto se logra mediante la adaptación del modelo al problema y el desarrollo de un aplicativo computacional mediante el software Visual Basic for Applications que permita dar solución a diferentes problemas en las áreas de producción y distribución de la empresa. Cabe resaltar que la empresa cuenta con una estrategia de distribución basada en el modelo Tienda a Tienda, este es uno de los modelos más costosos y complejos, por lo tanto, cualquier tipo de error de los procesos puede resultar en altos costos (Cámara de Comercio de Cali, 2012).

2. Revisión de la literatura

El agente viajero o TSP fue el primer problema desarrollado tipo VRP; recibe este nombre porque puede describirse en términos de un agente vendedor que visita cierta cantidad de ciudades en un solo viaje, de tal manera que inicie y termine su recorrido en la ciudad de origen; determinando cuál ruta debe seguir, para visitar cada ciudad una sola vez y regresar con la distancia total mínima (Olivera, 2004).

El modelamiento matemático del TSP debe definir un conjunto finito de n ciudades ($Ciudades = \{1,2,3,\dots,n\}$) y un conjunto de rutas que conectan las ciudades entre sí, donde la ruta $(i,j) \in E$. Cada par de ciudades puede estar conectadas o no y su distancia se define como C_{ij} (C_{ij} no necesariamente es igual que C_{ji}); además se usa una variable binaria X_{ij} que indica si el viajero utiliza en arco de la ciudad i a la j en su recorrido solución. (Espinosa Tellez, Sánchez Rodríguez, & Bernal, 2016) La función objetivo se presenta en la expresión (1).

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Como estructura restrictiva del modelo TPS, se considera que el vehículo debe partir de un nodo o ciudad de origen (2), así como se debe asegurar que el vehículo llegue a su ciudad destino (3).

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j = 1 \dots n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n X_{ij} = 1 \quad \forall j = 1 \dots n \quad (3)$$

El primer modelo propuesto efectivo que logró resolver el TSP fue desarrollado en 1964 por Clarke and Wright. Este método parte de rutas que contienen un único nodo para encontrar el mejor par-nodo, ruta- que representan la mejor intersección (Toth & Vigo, 2002). El algoritmo de los ahorros de Clarke and Wright se aplica a problemas para los cuales el número de vehículos es una variable de decisión; al utilizar los arcos, se calcula el mayor ahorro en distancia. Si en una solución se encuentran dos rutas diferentes, y estas dos pueden ser combinadas para obtener una nueva solución, en la cual se encuentra el mayor ahorro en sus arcos, entonces se utilizará esa nueva ruta (Toth & Vigo, 2002) (Olivera, 2004). La descripción de la heurística Clark and Wright, se presenta a continuación.

Inicialmente, se calcula una distancia euclidiana entre parejas de ciudades, ver expresión (4).

$$c_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

Donde x_i, y_i, x_j, y_j son las ubicaciones geográficas de los clientes i y j . Por otra parte, el valor de ahorro entre el cliente i y j se calcula mediante la expresión (5)

$$s_{ij} = c_{1i} + c_{j1} - c_{ij} \quad (5)$$

Después de calcular todos los ahorros, estos se recopilan en una lista de ahorros, donde se selecciona el mayor ahorro por pareja de clientes, de tal forma que se tome la decisión de una ruta adecuada, según la inserción de los clientes en dicha ruta. Los problemas de ruteo de vehículos se pueden adaptar a problemáticas asociadas a la planeación detallada de la producción, más exactamente al problema de secuenciación de operaciones de manufactura (Saenz Villavicencio, Menéndez Pérez, Ciudad Ricardo, & Puentes Puenes, 2015). Por tanto, el algoritmo de Clarke and Wright también es utilizado en problemas de secuenciación tipo Flow Shop. Por ende, cada operación (excepto la primera) tiene exactamente una predecesora y cada operación (excepto la última) tiene solamente un sucesor directo (Pinedo, 1995).

Por otra parte, la programación de operaciones (scheduling), se puede interpretar como la asignación de recursos (personas, tareas, vehículos, etc.), a un determinado modelo, con el fin de lograr la optimización de dichos recursos y satisfacer las restricciones impuestas. (Lawler, Lenstra, Rinnooy Kan, & Shmoys, 1993).

Dentro de los problemas de planificación existen tres componentes fácilmente identificables: las tareas o trabajos que se deber realizar, los recursos disponibles, sean maquinas o herramientas, y las finalidades o función objetivo que se pretende lograr. (Méndez Hernández, Martínez Jiménez, Coto Palacio, & Rodríguez Bazan, 2017)

3. Definición del problema

Harinas San Martín es una empresa que se dedica a la producción y comercialización de harinas, cuchucos y granos, se encuentra ubicada en el municipio de Piedecuesta, comercializando sus productos en Bucaramanga y su área metropolitana. Como se ha conceptualizado anteriormente, el algoritmo de Clark and Wright puede aplicarse a problemas de ruteo de vehículos y secuenciación de operaciones. Dado esto, la empresa Harinas San Martín puede abordar esta metodología para solucionar sus problemas.

En primer lugar, se encuentra el problema referente a secuenciación de producción tipo flowshop, donde se desea minimizar el makespan (Cmax) (lapso de tiempo del inicio del primer trabajo al procesamiento del último, para el total de órdenes demandadas), indicando que para procesos continuos (Flowshop) el tiempo de procesado de cada trabajo, para un mismo producto, con características iguales, es fijo (Salazar & Medina, 2013); mientras que los tiempos de preparación de las máquinas dependen del orden de trabajo en que pueden ser procesados los productos.

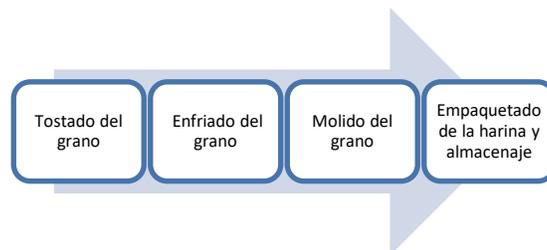


Figura 1. Proceso productivo de las harinas. Fuente: Autores

En este caso la empresa elabora tres harinas diferentes (Cuchuco de maíz, Cuchuco de cebada y Harina de tostado), adicionalmente, se considera que la empresa cuenta con una única máquina para realizar cada uno de los cuatro procesos productivos mostrados en la Figura 1, teniendo en cuenta que solo puede procesar un tipo de producto a la vez, generando conflictos en el orden de elaboración, al requerir priorizar la fabricación de un producto en temporadas de demandas altas. Por lo tanto, la función objetivo es:

$$\text{Min Makespan}_{ij} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 (T_{operativo_{ij}} + T_{setup_{ij}}) \quad (6)$$

Donde se hace referencia a minimizar el tiempo de las actividades operativas totales de todos los procesos (j) y todas las referencias a producir (i) y el tiempo de preparación existente entre los procesos (j) para la producción de todos los productos (i). En cuanto a la logística de distribución de la empresa, se encuentra el problema del agente viajero (TSP), pues se dispone de un solo vehículo para entregar diferentes pedidos a 24 clientes en una sola ruta, con el objetivo de minimizar la distancia total recorrida y el tiempo empleado para ello, por tanto, el problema puede formularse de la siguiente manera:

Tomando como referencia la ecuación (1), se tiene que la función objetivo es la distancia mínima de la sumatoria de las distancias entre un cliente origen (i) hasta un cliente destino (j), donde la

distancia desde (i, j) no es la misma que (j,i) debido al sentido de las calles de la zona donde la empresa realiza la distribución. Dicha distancia se multiplica por una variable binaria X_{ij} , que indica si se realiza el recorrido (igual a 1), o no (igual a 0) en la solución factible. Teniendo en cuenta los 24 clientes con los que se cuentan y que el vehículo debe regresar al punto de partida, la función se plantea como se muestra en la ecuación (7).

$$\min \left(\sum_{i=1}^{25} \sum_{j=1}^{25} C_{ij} X_{ij} \right) \quad (7)$$

Como adición, se tienen en cuenta tres restricciones que indican que el repartidor debe llegar y abandonar cada cliente exactamente una vez (8) (9) y que todo subconjunto de nodos S debe ser abandonado al menos una vez (10), esto con el fin de evitar pasar dos veces por el mismo cliente.

$$\sum_{i=1, i \neq j}^{25} X_{ij} = 1 \quad \forall j = 1 \dots n \quad (8)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{25} X_{ij} = 1 \quad \forall j = 1 \dots n \quad (9)$$

$$\sum_{i \in S, j \in \Delta^+(i) \setminus S} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V \quad (10)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E$$

4. Metodología

Como se mencionó anteriormente, este problema cuenta con dos fases, una relacionada a la secuenciación de producción tipo flow shop y la segunda fase se enfoca en un problema de ruteo de vehículos conocido como problema del agente viajero. Para abordar estos problemas se desarrolló una serie de puntos claves secuenciados de manera lógica.

A. Recolección y análisis de datos

Para el problema de secuenciación de las operaciones productivas, se recolectaron los tiempos en minutos de procesamiento en cada una de las fases de producción, así como los tiempos de alistamiento empleados para cambiar de un producto a otro, y se registraron en una matriz. Esta toma de datos se repitió para varias muestras, para finalmente trabajar con los promedios, con el fin de mitigar el efecto de la variación de los tiempos de procesamiento de las máquinas. Los datos de las distancias para el problema de ruteo mínimo se obtuvieron mediante un sistema global de navegación por satélite, teniendo en cuenta todas las distancias entre cada uno de los 24 clientes; con esto se generó la matriz de distancias tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Matriz de distancias (km)

Distancias (km)	0	1	2	3	24
0	0	1,5	1,3	1,0	1,3
1	1,6	0	0,064	0,7	1,8
2	1,5	0,16	0	0,75	2,0
3	1,2	0,6	0,45	0	1,7
24	0,9	1,4	1,4	1,6	0

Dado que es un proceso de asignación, se asume que los tiempos de alistamiento dependen de la secuencia de producción, es decir, el orden de productos afecta el tiempo total de producción.

B. Adaptación del modelo a la programación y simulación

Dado que ambas fases se abordaron con el mismo algoritmo de Clarke and Wright, y aunque se trabajaron diferentes variables, solo fue necesario adaptar un modelo general, del cual se generaron dos pseudocódigos para cada problema, donde se integraron diferentes variables. Para esto se realizó una analogía en donde los tiempos de alistamiento entre los productos son las distancias a recorrer entre los clientes, como se muestra en la ilustración 1 y 2.

<p>Sub método de ahorros Definir lista de procesos ordenados de 1 a n While (Lista de procesos no vacía) do Asignar primer proceso de la lista como primer proceso de la secuencia While (Secuencia no completa) Agregar a secuencia proceso no asignado que origina menor setup End while Calcular Cmax de secuencia Eliminar primer proceso de ListaProcesos End while Solución ← Secuencia de menor Cmax End sub</p>	<p>Sub mínima tiempo de recorrido Definir lista de clientes ordenados de 1 a n While (Lista de clientes no vacía) do Asignar primer cliente de la lista como primer cliente a visitar While (Ruta no completa) Agregar a Ruta cliente no asignado que origina menor distancia End while Calcular distancia total de la ruta Eliminar cliente de Lista clientes End while Solución ← ruta de menor distancia total End sub</p>
---	---

Ilustración 1 Pseudocódigo Flow shop Fuente: Autores Ilustración 2 Pseudocódigo TSP Fuente: Autores

5. Resultados

Mediante la implementación del algoritmo de ahorros de Clarke and Wright, en la solución del problema de Secuenciación de operaciones y el problema de ruteo de Vehículos presentado en la empresa Harinas San Martín, se obtuvieron los siguientes resultados:

Para el problema de secuenciación de operaciones se aplicó el algoritmo con el fin de buscar el orden adecuado de producción de las referencias fabricadas por la empresa, teniendo en cuenta factores como el tiempo operativo y tiempo de alistamiento de cada uno de los productos.

Tabla 1 Solución al problema de secuenciación

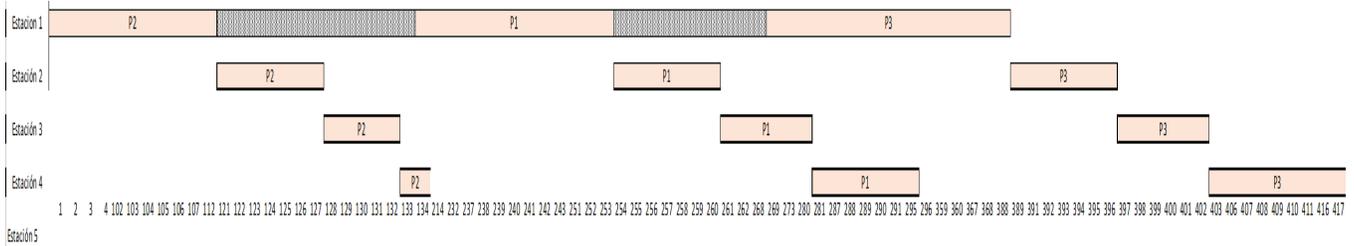
Cmax (min)	417		Harina Maíz	Cuchuco Maíz	Cuchuco Cebada
Estaciones	4	Secuencia	2	1	3

En la Tabla 3, se observa que el orden adecuado a utilizar en la producción de las harinas para disminuir el setup, corresponde a la fabricación del cuchuco de maíz en primer lugar, luego la



harina de maíz y por último el cuchuco de cebada, obteniendo un Cmax de 417 minutos. Para entender esta solución de una forma más clara, se presenta el diagrama de Gantt en la Figura 3

Figura 1. Diagrama de Gantt. Fuente: Autores



Ahora, para la solución del problema de ruteo de vehículos, también se aplicó el algoritmo de ahorros. Para desarrollar este, se realizó una matriz con las distancias calculadas de los puntos de partida, a los puntos de llegada, de la ruta realizada por el preventista, tomando los pedidos de 24 clientes, donde el cliente 0 es la empresa Harinas San Martín. Así mismo se sabe que la diagonal de la matriz es 0, pues no existe una distancia entre un punto con siglo mismo y que la distancia de un punto A un punto B, no es la misma que del punto B al punto A, ya que en esta influyen los sentidos de las calles y las carreras.

Una vez diligenciada la matriz, se procede a ejecutar el algoritmo, obteniendo como resultado la siguiente secuencia de destinos con una distancia total de 10,07 km. Para corroborar este dato, se muestra la ruta trazada sobre el mapa de Piedecuesta en la Figura 4.

Tabla 10. Solución factible

0	2	1	3	7	2	1	1	2	2	2	2	9	1	1	1	1	1	1	8	1	5	4	6
					0	9	8	3	2	4	1	1	5	6	4	3	2	0		7			

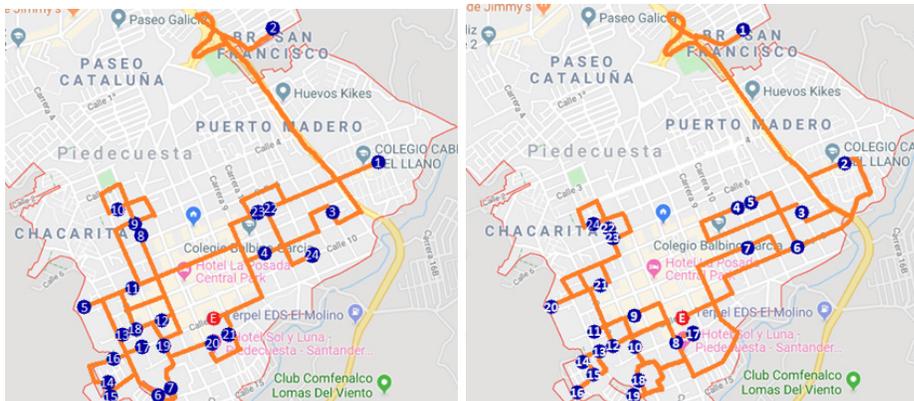


Figura 2. Ruta propuesta. Fuente: Autores Figura 3. Ruta Actual. Fuente: Autores

Como se puede apreciar, la ruta propuesta presenta una mejora de 1,03 km, pues la actual tiene una distancia de 11,1 km, la cual se muestra en la Figura 5. Así mismo, si la ruta encontrada por el algoritmo se implementa, se disminuirían los costos en combustible y tiempo.

6. Conclusiones

- En cuanto a la aplicación del modelo en el problema de ruteo, se arrojó una solución aproximada que da el orden en que el repartidor debe visitar los diferentes clientes, optimizando la secuencia de visita al minimizar la distancia total recorrida. Lo que significó una reducción de hasta un 9,28%, pues se pasa de una distancia de 11.1 a 10.07 Km.
- Al realizar los análisis y evaluar la simulación, se comprobó que la aplicación de la heurística en el problema de ruteo y secuenciación resulta ser más efectiva que los métodos que actualmente maneja la empresa, promoviendo con esto no sólo una reducción de las distancias y tiempos, sino también en costos; siendo esto un factor importante en el incremento de la productividad de la producción y la distribución.
- Los resultados proporcionados en este artículo demuestran las mejoras obtenidas tanto en distancia como de tiempo, mediante la aplicación del modelo Clarke-Wright a problemas del agente viajero en la empresa harinas San Martín. Sin embargo, este tipo de análisis puede ser replicado en otras empresas que presenten la problemática y obtener beneficios similares.

7. Referencias

- Cámara de Comercio de Cali. (11 de 4 de 2012). *Cámara de Comercio de Cali*. Recuperado el 26 de 8 de 2019, de <https://www.ccc.org.co/llegar-a-la-tienda-mas-que-armar-un-equipo-de-preventistas/>
- Espinosa Tellez, E. G., Sánchez Rodríguez, O., & Bernal, J. O. (2016). Problema del agente viajero. -Traveling Salesman Problem (TSP). *Ingeniería*, 1(2).
- Gómez Gasquet, P. (2010). *Programación de la producción en un taller de flujo híbrido sujeto a incertidumbre: arquitectura y algoritmos. Aplicación a la industria de la cerámica*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Lawler, E., Lenstra, J., Rinnooy Kan, A., & Shmoys, D. (1993). Sequencing and scheduling: Algorithms and complexity. *Handbooks in Operations Research and Management Science*.
- Méndez Hernández, B. M., Martínez Jiménez, Y., Coto Palacio, J., & Rodríguez Bazan,(2017). Algoritmos para problemas de secuenciación de tareas. *Investigación Operacional*, 38(ISSUE4), 400-406.
- Olivera, A. (2004). *Heurísticas para problemas*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la república.
- Pinedo, M. (1995). *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. New York : Prentice Hall.
- Roldán Reyes, E., Moras Sánchez, C., & Aguilar Lasserre, A. (2007). Optimización de las rutas de reparto de helado de la empresa Fricongelados Citlaltépetl. *Revista de la ingeniería industrial*, 1(1).
- Saenz Villavicencio, A. D., Menéndez Pérez, J., Ciudad Ricardo, F., & Puentes Puenes, U. (2015). El desarrollo de la habilidad: implementar algoritmos. Teoría para su operacionalización. *Revista Cubana de CIENCIAS INFORMÁTICAS*, 9(14p), 99-112.

- Salazar, H., & Medina, S. (2013). Minimización del makespan en máquinas con tiempos de preparación dependientes de la secuencia utilizando un algoritmo genético. *Ing. Invest y tecnolo.*, 14(1).
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle Routing Problem*. Filadelfia, USA: SIAM.

Sobre los Autores

- **Juan David Tarazona Barragán:** Estudiante de Ingeniería Industrial. juan.tarazona.2016@upb.edu.co
- **Orlando Federico González Casallas:** M.Sc. en Ingeniería Industrial. Profesor titular de Universidad Pontificia Bolivariana. orlando.gonzalez@upb.edu.co
- **Lady Karina Buitrago Portilla:** Estudiante de Ingeniería Industrial. lady.buitrago.2016@upb.edu.co
- **Andrés Felipe Muñoz Buenahora:** Estudiante de Ingeniería Industrial. andres.munoz.2016@upb.edu.co
- **Silvia Alejandra Pineda Villamizar:** Estudiante de Ingeniería Industrial. silvia.pineda.2016@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)