

# Cross-docking with vehicle routing problem. A state of art review

Elsa Cristina González-La Rotta and Mauricio Becerra-Fernández

Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. [ecgonzalez@ucatolica.edu.co](mailto:ecgonzalez@ucatolica.edu.co), [cristinagonzalez2008@gmail.com](mailto:cristinagonzalez2008@gmail.com),  
[mbecerra@ucatolica.edu.co](mailto:mbecerra@ucatolica.edu.co), [mauriciobecerrafernandez@gmail.com](mailto:mauriciobecerrafernandez@gmail.com)

Received: November 3<sup>rd</sup>, 2016. Received in revised form: January 27<sup>th</sup>, 2017. Accepted: February 16<sup>th</sup>, 2017.

## Abstract

This article reviews the state of the art for the last ten years about the literature related to Cross-Docking. The Cross-Docking systems emerge as an alternative to reduce logistics costs and customer response time in some processes such as warehousing and material handling, times by reducing storage and picking, on the docks of inbound and outbound of vehicles. In the first part, the concept of Cross-Docking is developed, also its operating performance and classification. In the second part, a report on the most relevant works is done. Subsequently, it delves into the issue of vehicle routing and Cross-Docking with emphasis on methods of solution, since it is a combinatorial optimization problem classified as NP-hard. The document ends with the conclusions and discussion.

**Keywords:** Transportation, Warehousing, Logistics, Supply Chain, Vehicles.

# Plataformas de intercambio con ruteo de vehículos. Una revisión del estado del arte

## Resumen

Este artículo presenta una revisión al estado del arte durante los últimos diez años, de la literatura relacionada con las plataformas de intercambio logísticas, denominadas *Cross-Docking*. Este tipo de sistemas surgen como alternativa para reducir el costo logístico y el tiempo de respuesta al cliente. El objetivo consiste en simplificar algunos procesos tales como almacenamiento y manejo de materiales, a partir de la reducción de períodos de bodegaje y realización de surtida de materiales en los muelles de ingreso y salida de mercancía. En la primera parte, se desarrolla el concepto, su funcionamiento operativo y clasificación. En la segunda parte, se realiza un reporte de los trabajos más relevantes acerca de esta técnica. Posteriormente, se profundiza en este tema y el ruteo de vehículos simultáneos, haciendo énfasis en los métodos de solución, puesto que se trata de un problema de optimización combinatoria, clasificado como de alta complejidad computacional. Al final, se presentan conclusiones y la discusión.

**Palabras clave:** Transporte, Almacenamiento, Logística empresarial, Cadena de Suministros, Vehículos.

## 1. Introducción

La logística persigue el objetivo de maximizar el flujo de materiales a un mínimo costo, es por esto que estrategias novedosas como el *Cross-Docking*, surgen como alternativa a los métodos tradicionales de almacenamiento y distribución, donde es necesario contar con la intensiva utilización de recursos físicos y humanos tendientes a la preservación y traslado de inventarios. Con el fin de contrarrestar ineficiencias tales como: camiones parcialmente cargados y largos tiempos de espera para el

cliente, se han formulado algunas soluciones tales como el concepto de almacenamiento cero y las plataformas de intercambio tipo *Cross-Docking*, como complementarias a los centros de distribución y almacenes, en el diseño de redes de distribución [1].

A pesar de los evidentes beneficios del *Cross-Docking*, este involucra operaciones interrelacionadas tales como la programación y el ruteo de vehículos, lo que implica altos niveles de planeación y sincronización [2] de la entrada y salida de camiones, además de la asignación de muelles (*dock*) para la descarga, *picking* y carga de mercancías.

**How to cite:** González-La Rotta, E.C. y Becerra-Fernández, M., Plataformas de intercambio con ruteo de vehículos. Una revisión del estado del arte, DYNA 84(200), pp 271-280, 2017.

En este artículo se hace una revisión al estado del arte de *Cross-Docking* con ruteo de vehículos, tomando como ventana de observación los últimos diez años. Se consideraron trabajos reportados entre el 2006 y 2016. Al utilizar únicamente el descriptor “*Cross-Docking*”, se encontraron un total de 677 referencias en *Science Direct* y 385 en *Scopus*. Con el fin de refinar esta búsqueda, dentro de los resultados obtenidos, se emplearon también las palabras “*vehicle routing problem*”; de esta manera, se registraron 4 coincidencias en *Science Direct* y 109 para *Scopus*. Dichos documentos fueron analizados y seleccionados, para responder las siguientes interrogantes: ¿Qué concepto de *Cross-Docking* ha sido reportado por la literatura?, ¿Cuáles han sido los trabajos más relevantes? ¿Qué han aportado estos a dicha temática? ¿En qué consiste el problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking*?, y ¿Cuáles las técnicas de solución desarrolladas para este problema de optimización combinatoria?

## 2. Cross-Docking

### 2.1. Concepto de Cross-Docking

Se conceptualiza el *Cross-Docking* como una estrategia logística para la distribución de materias primas y productos con la mínima utilización de almacenes intermedios [3], que puede tener diferentes metas: consolidación de envíos, optimización de la capacidad de los camiones, menores tiempos de respuesta y reducción de costos [4].

A continuación, se reportan diferentes definiciones de *Cross-Docking*, que recogen en su esencia, lo reportado por los artículos revisados. Como puede observarse, abordan su finalidad desde diferentes procesos logísticos:

- Se considera una técnica de manejo de materiales y distribución, en la cual los productos son transferidos directamente de la puerta de recibo a la puerta de embarque; esto reduce tiempos de almacenamiento y las funciones de preparación de pedidos en almacén [5].
- En una red de suministro, se considera una estrategia de reducción de costos innecesarios, que minimiza los niveles de inventario [6].
- Consiste en una estrategia que difiere del almacenamiento tradicional en centros de distribución, puesto que la consolidación de pedidos entrantes se realiza en la misma plataforma, basados en los datos de demanda del cliente, a quienes se les realiza el envío de la manera más rápida posible [7].
- Proceso de mover bienes desde los proveedores hasta los consumidores a través de una plataforma sin un largo tiempo de almacenamiento en esta locación, preferiblemente enfocada hacia industrias con alto costo de distribución [8].
- Procedimiento que permite mayor rapidez en el flujo de materiales, a partir de la coordinación y sincronización de los embarques entrantes y salientes; dando como resultado un grado deseado de capacidad de respuesta al cliente, a un bajo costo [9].

En síntesis, en el contexto de esta investigación, los autores del presente artículo, definen el *Cross-Docking* como una estrategia utilizada en la cadena de suministro, con el fin de contribuir al

cumplimiento de los objetivos de la misma: incrementar la rentabilidad total y reducir los tiempos de respuesta al cliente, a través de variadas técnicas tales como la eliminación de almacenamientos por períodos mayores a 24 horas, el incremento en la eficiencia de las operaciones de *picking* o alistamiento de pedidos, rutas de mínimo costo y programación o *scheduling* de vehículos para optimizar la capacidad de los recursos.

### 2.2. Funcionamiento del Cross-Docking

Una vez conceptualizado el *Cross-Docking*, es necesario entender su funcionamiento a nivel operativo, con el fin de evidenciar los retos en sincronización y programación que esta estrategia exige.

La reducción en el tiempo de respuesta y la flexibilidad, son las directrices de una cadena de suministro competitiva. El *Cross-Docking* permite a través de la consolidación de pedidos, ahorros a través de economías de escala [10]. Optar por diseñar una red de distribución con plataformas de intercambio, para el transbordo y sincronización de vehículos de ingreso y salientes, minimiza las operaciones más costosas del almacenamiento: bodegaje, debido al costo asociado al mantenimiento de inventario; manejo de materiales y alistamiento de pedidos (*picking*), por la utilización intensiva de mano de obra [3].

Tabla 1.  
Configuraciones de red para *Cross-Docking*.

Cross Dock	Partida	Destino	Aplicaciones
Una	Pocos	Muchos	Distribución por <i>retail</i> . Ingresan pocos camiones de centros de distribución, se consolidan envíos en una sola plataforma y se distribuye a varios puntos <i>retail</i> .
Una	Muchos	Pocos	Industria manufacturera. Muchos proveedores, una sola plataforma para preparación de actividades de logística interna para entregar a pocas plantas cercanas de ensamble.
Una	Muchos	Muchos	Paquetería. Se recogen lotes pequeños de muchos puntos y se manejan generalmente en bandas transportadoras para posteriormente consolidar envíos para muchos destinos.
Múltiples	Muchos	Muchos	Diseños de red de una sola capa ( <i>single layer of cross-docks</i> ). Aplicados en diseños de cadena con gran cantidad de fabricantes y minoristas.
Múltiples	Pocos o muchos asignados a una Cross-Dock	Pocos o muchos asignados a una Cross-Dock	Diseños de red de centro y satélites ( <i>hub-and-spoke</i> ). Se forman clúster de puntos de recolección o de entrega y se asignan a una <i>cross-dock</i> satélite. Una red de <i>cross-dock</i> , se interconecta con una plataforma central. Aplicable en empresas de mensajería.

Fuente: Adaptado de Bujis, Vis y Carlo, 2014.

Además del proceso logístico de almacenamiento, la planeación operativa del *Cross-Docking*, involucra diferentes aspectos tales como: ruteo de vehículos, asignación de muelles de carga/descarga y la programación de camiones [11].

La operación requiere que los embarques entrantes sean descargados desde adentro del camión sobre una plataforma terminal (*staging*), con un mínimo espacio de almacenamiento, en el cual los artículos deben ser ordenados, consolidados y directamente transferidos a los vehículos de salida, que los conducirán hacia sus destinos [12].

Desde un enfoque de redes, la operación consiste en un subsistema de la cadena de suministro, formado por una o más plataformas *Cross-Dock* [13], junto con las rutas de ingreso y egreso de mercancías y, las partes interesadas (*stakeholders*) conectadas tales como: proveedores, fabricantes, centros de distribución, mayoristas, detallistas y consumidores [14].

La Tabla 1 presenta una clasificación en la que se determinan las configuraciones y las aplicaciones más usuales.

### 2.3. Tipos de Cross-Docking

En [15] se propone una clasificación de plataformas *Cross-Docking* de acuerdo con unos criterios tales como: características físicas, operacionales y de flujo.

Las características físicas corresponden a la forma: Forma de letras del alfabeto (L, X, T, H) y número de puertas de carga/descarga que tenga la plataforma, entre 2 y 500 puertas.

En cuanto a las características operacionales, pueden darse: Modo de servicio para cada puerta, si es exclusiva para entrada o salida de camiones o por el contrario, las puertas pueden combinarse; y, modo de servicio interrumpido o continuo, es decir, si se está cargando un camión, puede interrumpirse la operación para dar paso a la carga de otro.

En cuanto al flujo, se puede contemplar si la flota es:

- Dedicada o intercambiable, de acuerdo con los productos.
- El patrón de arribos, teniendo en cuenta la periodicidad y el número de camiones.
- El tiempo de salida se refiere a si existe o no alguna ventana de tiempo para el despacho.
- El almacenamiento, que puede necesitarse temporalmente o no.
- Otra clasificación propuesta también consiste en basarse en el número de toques a tierra o de etapas:
- *Cross-Docking* de un toque. Los productos son manipulados solamente una vez, cuando son recibidos y cargados directamente en los camiones de salida.
- *Cross-Docking* en dos toques o *Cross-Docking* de una sola etapa. Los productos son recibidos y colocados en el muelle antes de ser cargados por el transporte saliente. Usualmente las mercancías son puestas en zonas correspondientes a puertas de apilado.
- *Cross-Docking* multi-toque o de dos etapas. Los productos son recibidos y apilados en el muelle, entonces estos se reconfiguran para envíos y son cargados en los camiones de salida.

El *Cross-Docking*, permite volúmenes pequeños de inventarios y cortos tiempos de distribución, sin embargo,

podría ser una estrategia no tan efectiva en casos donde la demanda es variable.

### 2.4. Tendencias de investigación en Cross-Docking

A continuación, en la Tabla 2 se presentan las investigaciones más relevantes acerca de *Cross-Docking*, dentro de la ventana de observación propuesta en este trabajo. En esta sección no se tiene en cuenta el problema de ruteo de vehículos. Esta es una revisión complementaria al objetivo principal de revisar el estado del arte de estos dos conceptos en conjunto; la finalidad es establecer posibles campos de investigación futura y la concentración en tópicos que son tendencia.

Tabla 2. Trabajos relacionados con *Cross-Docking*.

Autor	Contenido	Contribución
Agustina, Lee, and Piplani, 2010 [4]	Revisión a la literatura de los modelos matemáticos de <i>Cross-Docking</i> , desde la perspectiva de planeación.	Nuevas fuentes de investigación en planeación de <i>Cross-Docking</i> .
Agustina, Lee, and Piplani, 2014 [16]	Integra <i>Cross-Docking</i> , planeación de rutas y programación de vehículos en un solo modelo.	Aplicación a la distribución en la industria de alimentos, reduce los tiempos y costos de almacenamiento.
F. Ahmadizar, M. Zeynivand, and J. Arkat., 2015 [17]	Modelo de ruteo de vehículos con <i>Cross-Docking</i> el cual tiene en cuenta el costo de transporte, diferentes proveedores y precios.	Función objetivo que minimiza el costo de compra, transporte y almacenamiento. Resuelto con un algoritmo genético híbrido.
G. Alpan, A.-L. Ladiet, R. Larbi, and B. Penz, 2011 [18]	Estudia un modelo de transporte y asignación a múltiples muelles de entrada y salida, en una configuración <i>Cross-Docking</i> .	Se comparan heurísticas con una solución exacta con el fin de determinar la ejecución de las mismas.
G. Alpan, R. Larbi, and B. Penz, 2011 [19]	Estudia una plataforma <i>Cross-Docking</i> con varios muelles de recibo y embarque.	La función objetivo optimiza el costo mínimo de operaciones de transbordo en las instalaciones.
A. Amini and R. Tavakkoli-Moghaddam, 2016 [20]	Estudia el problema de programación de camiones en una plataforma <i>Cross-Docking</i> y los tiempos de averías, los cuales son modelados a partir de una distribución de Poisson.	Desarrolla que encuentra la solución óptima a través de tres meta-heurísticas, denominadas: <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)</i> , <i>Multi-Objective Simulated Annealing (MOSA)</i> y <i>Multi-Objective Differential Evolutionary (MODE)</i> .
M. T. Assadi and M. Bagheri, 2016 [21]	Adopta la filosofía Justo a Tiempo para la programación de camiones, en un modelo que penaliza la llegada muy temprana o tardía de camiones.	Modelo de programación entera mixta resuelto para instancias pequeñas con ILOG CPLEX. En problemas de talla mediana y grande, dos meta-heurísticas: <i>Differential evolution</i> y <i>Population-based</i>

Autor	Contenido	Contribución
J. Van Belle, B. Saint Germain, J. Philips, P. Valckenaers, D. Cattrysse, 2013 [22]	Aborda las tareas de los administradores logísticos en los sistemas <i>Cross-Docking</i> complejos.	<i>simulated annealing</i> . Multiagentes para simular relaciones de cooperación
A. Boloori Arabani, M. Zandieh, and S. M. T. F. Ghomi, 2011 [23]	Soluciona un problema de programación de <i>Cross-Docking</i> , sobre el tiempo total de funcionamiento del sistema ( <i>makespan</i> ).	Función multiobjetivo resuelta a partir de diferentes algoritmos: <i>non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II)</i> , <i>strength Pareto evolutionary algorithm-II (SPEA-II)</i> , y <i>sub-population genetic algorithm-II (SPGA-II)</i>
A. R. Boloori Arabani, S. M. T. Fatemi Ghomi, and M. Zandieh, 2011 [24]	Diferentes meta-heurísticas para encontrar la mejor secuencia de entrada y salida de camiones, que logre minimizar el tiempo total de operación ( <i>makespan</i> ).	Se puede demostrar el buen desempeño de las meta-heurísticas utilizadas en problemas con gran cantidad de camiones entrantes y salientes.
P. Buijs, N. B. Szirbik, G. G. Meyer, and J. C. (Hans) Wortmann,, 2012 [25]	Mediante un estudio de caso, se pone de manifiesto la complejidad del <i>Cross-Docking</i> , como herramienta de control operacional.	Aporta una discusión para los tomadores de decisiones, acerca de cómo utilizar la información.
F. Chen and K. Song, 2009 [26]	Programación híbrida de <i>Cross-Docking</i> de dos etapas.	Aplicación en un contexto productivo, el objetivo es minimizar el <i>makespan</i> .
M. C. Chen, Y. H. Hsiao, R. Himadeep Reddy, and M. K. Tiwari, 2016 [27]	Estudia una distribución con múltiples muelles en una plataforma <i>Cross-Docking</i> .	Se resuelve con una hibridación entre <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i> con un modelo de inteligencia artificial llamado <i>SLPSO</i> .
M. E. Cóccola, C. A. Méndez, M. Zamarripa, and A. Espuña, 2012 [28]	Aplicación de <i>Cross-Docking</i> con múltiples restricciones en una cadena de suministro.	Modelo de programación lineal entera mixta ( <i>MILP</i> ) para programación de producción y distribución.
S. Gelareh, R. N. Monemi, F. Semet, and G. Goncalves, 2016 [29]	Problema de asignación de camiones con restricciones de tiempos operacionales.	Problema de asignación con varios sub-problemas. Se resuelve mediante un algoritmo de ramificación y corte.
P. Hanchuan, W. Rui Fang, D. Hao, and Z. Feng, 2013 [30]	Modela un sistema logístico entero con estrategia <i>Cross-Docking</i> , con función objetivo de costo.	Modelo de programación dinámica, demostrando que <i>Cross-Docking</i> se ajusta a demandas y tiempos de espera variables.
D. Hermel, H. Hashemini, N. Adler, and M. J. Fry, 2016 [31]	Propone un modelo denominado: Problema de <i>Cross-Docking</i> multi-modo con restricciones de recursos ( <i>Multi-Mode Resource-Constrained Cross-Dock Scheduling Problem MRCDSP</i> ).	Se minimiza el tiempo total de procesamiento sujeto a restricciones de recursos en la plataforma <i>Cross Dock</i> .
M. Horta, F. Coelho, and S.	Propone un modelo matemático de la re-	Basado en un enfoque <i>mini-max</i> para
Autor	Contenido	Contribución
Relvas, 2016 [32]	localización de tiendas dentro de un <i>retail</i> .	localización, probado en un caso real para productos perecederos, disminuyendo los recorridos de los trabajadores.
D. Kalenatic and C. Bello, 2007 [33]	Modelo de logística focalizada, aplicada a un contexto militar.	Encuentra la localización de una plataforma <i>Cross-Docking</i> y asignación de medios de transporte para garantizar una distribución ágil.
M. Keshzari, B. Naderi, and E. Mehdi Zadeh, 2016 [34]	Propone una solución a la medida para un sistema de distribución <i>Cross Doking</i> , mediante un modelo de programación entera mixta.	Propone método Taguchi y se evalúa contra dos meta-heurísticas: algoritmos genéticos y <i>particle swarm optimization</i> hibridada con recocido simulado.
D. Konur and M. M. Golias, 2013 [35]	Plantea la programación de camiones entrantes y salientes en una plataforma <i>Cross-Docking</i> con tiempos de arriba inciertos.	Se propone un problema de optimización bajo enfoque pesimista y optimista. Se propone solución con algoritmos genéticos.
Y. Kuo, 2013 [36]	Modelo que minimiza el tiempo de operación total ( <i>makespan</i> ), el autor reporta una propuesta no presentada hasta ese momento en la literatura.	Se propone un método para calcular el <i>makespan</i> , mediante la integración de las meta-heurísticas de búsqueda variable de entornos ( <i>variable neighborhood search VNS</i> ) y recocido simulado ( <i>simulated Annealing</i> ).
A.-L. Ladier and G. Alpan, 2016 [14]	Propone una revisión al estado del arte de <i>Cross-Docking</i> frente a las prácticas reales en la industria.	Encuentra que hay gran cantidad de literatura pero separada de la realidad en la industrial.
A.-L. Ladier and G. Alpan, 2016 [37]	Propone un modelo robusto para la programación de camiones con ventanas de tiempo para un sistema <i>Cross-Docking</i> .	Se modelan las ventanas de tiempo y algunas condiciones de incertidumbre no modeladas por la literatura hasta ese momento.
R. Larbi, G. Alpan, P. Baptiste, and B. Penz, 2011 [38]	Estudia las operaciones de transbordo dentro de la plataforma <i>Cross-Docking</i> .	Modela tres políticas de programación, de acuerdo con la disponibilidad de la información.
T. W. Liao, P. J. Egbelu, and P. C. Chang, 2013 [39]	Minimiza de manera simultánea la asignación y secuenciación de ingreso de camiones a una plataforma <i>Cross-Docking</i> .	Resuelve a través de seis diferentes meta-heurísticas: recocido simulado, búsqueda tabú, evoluciones diferenciales ( <i>differential evolution</i> ) y dos heurísticas más hibridadas.
M. Madani-Isfahani, R. Tavakkoli-Moghaddam, and B. Naderi, 2014 [40]	Problema de programación de camiones en una plataforma <i>Cross-Docking</i> con varios muelles, con almacenamientos temporales, restricciones de capacidad y tiempos	Propone un modelo de programación entera mixta para minimizar el tiempo total de operación, se resuelve mediante la aplicación de recocido simulado y <i>firefly algorithms (FA)</i> .

Autor	Contenido	Contribución	Autor	Contenido	Contribución
	de demora.			actividades de taller ( <i>shop-floor</i> ) y salida de camiones.	en CPLEX.
M. Y. Maknoon, O. Kone, and P. Baptiste, 2014 [41]	Modela la minimización del costo de manejo de materiales en una plataforma <i>Cross Doking</i> satélite.	Desarrolla una heurística secuencial en diferentes tamaños de problemas.	W. Shi, Z. Liu, J. Shang, and Y. Cui, 2013 [51]	Propone diseñar una configuración para <i>Cross-Docking</i> con perturbaciones de incertidumbre en el suministro.	Solución basada en simulación discreta por eventos y la técnica del diseño robusto.
M. Y. Maknoon, F. Soumis, and P. Baptiste, 2016 [42]	Modelo de programación de operaciones en una plataforma <i>Cross Doking</i> para reducir el transbordo de carga.	Resuelve una heurística de búsqueda de entornos variables ( <i>variable neighborhood search VNS</i> ).	J. P. Soto Zuluaga, M. Thiel, and R. Colomé Perales, 2017 [52]	Modelo de logística de reversa implementado al <i>Cross-Docking</i> .	Modelo de programación lineal. Los resultados presentados muestran incremento de la eficiencia en factores como reducción en costos, ahorro de tiempos y mejoramiento de la gestión de la información en el proceso de retorno.
A. Mohtashami, 2015 [43]	Se modela la programación de vehículos en un sistema <i>Cross-Docking</i> .	Propone un nuevo algoritmo genético dinámico que reduce el tiempo total de operación.	K. Stephan and N. Boysen, 2011 [1]	Estado del arte.	Presenta el concepto de <i>Cross-Docking</i> , las clasificaciones relevantes. Se identifican potenciales fuentes para futuras investigaciones.
A. Mohtashami, 2015 [44]	Se modelan dos escenarios para el ingreso, carga y salida de camiones. La función objetivo busca minimizar el tiempo total de operación.	Algoritmo genético donde se permite el almacenamiento temporal. Se reportan mejores resultados que en otros trabajos.	B. Trouillet, 2010 [53]	Se modela la asignación de camiones a los muelles <i>dock</i> . El modelo que busca minimizar los costos de penalización por camiones no disponibles.	Se combina un modelo de asignación de camiones reportado en la literatura con las redes de Petri, para el funcionamiento interno del <i>cross dock</i> .
R. Musa, J.-P. Arnaout, and H. Jung, 2010 [45]	Modelo que minimiza el costo de transporte desde los orígenes a los destinos, a través de una plataforma <i>cross dock</i> .	Algoritmo de colonia de hormigas, mostrando resultados positivos sobre el costo de transporte, aún en instancias grandes del problema.	B. Vahdani and M. Zandieh, 2010 [54]	El objetivo es minimizar el tiempo de operación del sistema <i>Cross-Docking</i> .	Se aplican cinco meta-heurísticas: algoritmos genéticos, búsqueda <i>TABU</i> , recocido simulado, <i>electromagnetism-like algorithm (EMA)</i> y búsqueda de entornos variables variable ( <i>neighbourhood search VNS</i> )
Y. Oh, C. N. Cha, and S. Lee, 2006 [46]	Acerca de los problemas operacionales de los sistemas <i>Cross-Docking</i> en un centro de distribución de correo.	Modelo no lineal que minimiza la distancia de viaje entre cada pallet en el centro de distribución. Caso real que se soluciona con dos métodos heurísticos.	J. Van Belle, P. Valckenaers, G. Vanden Berghe, and D. Cattrysse, 2013 [55]	Modela un problema de programación de camiones para entrada y salida con múltiples muelles <i>dock</i> .	Minimiza el tiempo total de viaje y las demoras. Se propone una búsqueda <i>TABU</i> para la solución
P. Pawlewski, 2015 [47]	Presenta un método para optimizar la operación de una terminal <i>Cross-Docking</i> multimodal.	Modelo de optimización asincrónico y multimodal.	I. F. A. Vis and K. J. Roodbergen, 2008 [56]	Modela un problema de <i>Cross-Docking</i> como un problema de flujo de mínimo costo.	Aplicabilidad del modelo para diferentes diseños de plataformas y prioridades.
S. Rahmanzadeh Tootkaleh, S. M. T. Fatemi Ghomi, and M. Sheikh Sajadieh, 2016 [48]	Encuentra la mejor secuencia de ingreso de camiones basado en el concepto de sustitución de cargas.	Algoritmo heurístico que se prueba mediante diferentes experimentos numéricos, que presentan una reducción de costos de almacenamiento hasta del 27%.	I. F. A. Vis and K. J. Roodbergen, 2011 [57]	Metodología de diseño dinámico para seleccionar políticas de control y determinar reglas de diseño para instalaciones <i>Cross-Docking</i> .	Presenta las ventajas y desventajas de los procedimientos de diseño de instalaciones propuestos.
R. Dondo and J. Cerdá, 2014 [10]	Contempla localización de <i>cross docks</i> , centros de distribución, múltiples familias de productos y tiendas <i>retail</i> .	Evalúa dos heurísticas que generan una solución factible global: recocido simulado y búsqueda <i>TABU</i> .	H. Yan and S. Tang, 2009 [58]	Modelos analíticos para distribución en dos tipos de <i>Cross-Docking</i> : pre-distribución <i>CD</i> y post-distribución <i>CD</i> .	Diferentes experimentos numéricos donde determinan que el <i>pre-CD</i> es aconsejable en entornos tiempo de respuesta cortos y baja incertidumbre, mientras que el <i>post-CD</i> es preferible para operaciones de alto costo.
Y. Sallez, T. Berger, T. Bonte, and D. Trentesaux, 2015 [49]	Se propone el desarrollo de un modelo denominado <i>Pi-cross-docking hubs</i> , que explora el internet físico ( <i>Physical Internet</i> ).	Reporta rapidez, eficiencia y flexibilidad en la transferencia de contenedores, mediante una simulación de la propuesta.			
C. Serrano, J. Moral, and X. Delorme, 2016 [50]	Modelo lineal entero mixto para la programación de arribo de camiones,	Caso de estudio aplicado en la industria automotriz. Se minimiza el costo operacional y se resuelve			

Autor	Contenido	Contribución
P.-Y. Yin, S.-R. Lyu, and Y.-L. Chuang, 2016 [2]	Función bi-objetivo para Cross-Docking bajo un enfoque de cooperación.	Híper-heurísticas para la solución de datos geográficos reales.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.

Clasificación de temáticas relacionadas con *Cross-Docking*

Temática	Porcentaje
Planeación táctica y operativa	4%
Alimentos y perecederos	2%
Aplicaciones en producción-distribución	6%
Control operacional	2%
Optimización	6%
Localización y <i>Cross-Docking</i>	4%
Meta-heurísticas	42%
Otros	33%

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3 presenta una propuesta de clasificación que resume las principales temáticas acerca del *Cross-Docking* sin ruteo de vehículos.

En “otros” se incluyeron estados del arte, programación dinámica, inteligencia artificial, redes de optimización y diseño de instalaciones.

Una vez analizados los resultados de la revisión aplicada, se observa que el 48% de los trabajos se centran en el método de solución: el 42% aplican meta-heurísticas para resolverlos, frente a un 6% que utilizan herramientas de optimización, esto deja ver la complejidad a nivel computacional del problema *Cross-Docking*; además de una marcada tendencia de los autores a proponer modelos enriquecidos con una gran cantidad de variables y parámetros, que exigen novedosos procedimientos algorítmicos.

Por otra parte, existe un amplio campo de posibilidades de investigación en aplicaciones en el sector real, particularmente en el diseño de redes de distribución de productos de consumo; que dado su volumen y características de demanda, son susceptibles de modelarse bajo entornos *Cross-Docking*.

Solamente un trabajo contempla condiciones de incertidumbre en el modelamiento, debido a que los modelos *Cross-Docking* tradicionalmente se aplican a demandas predecibles y altos volúmenes de consumo.

En el caso de entornos de producción-distribución simultáneos, solamente se proponen tres trabajos (6%), evidenciando una alta posibilidad de aplicaciones en ese campo.

### 3. Problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking*

Como se ha mencionado, el objetivo principal de este trabajo es realizar el estado del arte del *Cross-Docking* y ruteo de vehículos, simultáneos. En esta sección se abordarán las características específicas de este tipo de aplicaciones, el concepto y los aportes de la literatura.

#### 3.1. Definición de los problemas de ruteo de vehículos con *Cross-Docking*

Se define el problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking* como el conjunto de rutas de mínimo costo para una

flota de vehículos que cumple con la demanda de productos para una red de proveedores y clientes. Los vehículos salen de una plataforma terminal que cuenta con un mínimo espacio de almacenamiento [12]. Los vehículos salen y retornan del punto de origen, en este caso una plataforma *Cross-Docking*, los productos deben ser surtidos antes de ser repartidos a los consumidores [11]. Las rutas de los vehículos deben respetar restricciones de capacidad, ventanas de tiempo, asignación de muelles carga/descarga y la programación [59].

#### 3.2. Clasificación de trabajos relacionados

A continuación se presentan diferentes formulaciones y métodos de solución para *Cross-Docking* con ruteo de vehículos. Para clasificar los trabajos de acuerdo con el tipo de modelo planteado, se crearon seis (6) categorías: modelos que maximizan el flujo de material (Flujo), modelos cuya función objetivo es una función de costo (Costo), modelos de aplicación a cadenas de suministro (Cadena de suministro), modelos de localización de una o varias plataformas (Localización), modelos de consolidación de mercancías (Consolidación) y modelos con consideraciones ambientales (Ambiental). La Tabla 4 presenta las frecuencias observadas en los trabajos reportados.

Más de las dos terceras partes de los trabajos relacionados, presentan una función objetivo que busca reducir el costo de diferentes aspectos incluidos en la distribución. En [60] se expone que uno de los más importantes factores en gestión de la cadena de suministro es el control eficiente del flujo físico a través de la misma. Este trabajo se resolvió a través de un algoritmo heurístico basado en búsqueda TABU.

En los siguientes trabajos, la función objetivo minimiza el costo: en [61] se determina el número de vehículos y las rutas que minimizan la suma de los costos operacionales de transporte, se comparan los resultados con otros trabajos, obteniendo 50 soluciones a través de una meta-heurística de recocido simulado. En [62] se refieren a varios experimentos computacionales de una modificación al algoritmo de ramificación y precio. En [63] se aborda el VRP con entregas divididas (split vehicle routing problem) con restricciones de capacidad para múltiples productos en una plataforma *Cross Dock*. En [65] se reporta un modelo VRPCD (Vehicle Routing Problem with *Cross-Docking*), donde se propone un PDPCD (Pickup and Delivery Problem with *Cross-Docking*); se plantea una formulación de un modelo de programación entera, que se soluciona con un algoritmo de ramificación y precio. En [8] se soluciona un problema de ruteo de vehículos cuyas tareas de recogida y entrega se realizan en conjunto con

Tabla 4.

Clasificación de temáticas relacionadas *VRP* con *Cross-Docking*

Tipo de Modelamiento	Porcentaje
Flujo	5%
Costo	73%
Cadena de suministro	5%
Localización	9%
Consolidación	5%
Ambiental	5%

Fuente: Elaboración propia

la consolidación de embarques, mediante una heurística de barrido (sweep heuristic). En [66] resuelven un VRPCD (Vehicle Routing Problem with Cross-Docking) para un conjunto de vehículos homogéneos, con capacidad limitada y ventanas de tiempo. El modelo consiste en una formulación entera no lineal que se soluciona con un híbrido entre colonia de hormigas y recocido simulado. En [59] se comparan diferentes heurísticas para la solución del problema de ruteo de vehículos con Cross-Docking y hacen una comparación de resultados. En [16] se estudia una aplicación de Cross-Docking para productos alimenticios altamente perecederos. Se logra por primera vez la integración de programación y ruteo de vehículos en un solo modelo. Para reducir la talla del problema se generan clústeres de zonas de consumo de clientes y ventanas duras de tiempo; es decir, se plantea un modelo VRSP-CZHTW (Vehicle routing scheduling problem with clients zones and hard time Windows), que se resuelve para una talla pequeña en CPLEX. En [70] se aborda el problema de diseño de la red de transporte Cross-Docking, que se resuelve con recocido simulado, los resultados muestran reducciones en el costo total de transporte en la red diseñada frente a la distribución tradicional. En [71] se propone un modelo matemático multi-objetivo para minimización de tiempos de preparación, costo de transporte y del número de viajes de camiones en toda la cadena de suministro. En [72] se integra el ruteo y programación de vehículos. También se tiene en cuenta el embarque directo desde las fuentes a los consumidores. Se propone un modelo de aprendizaje llamado machine-learning-based heuristic method (MLBM). En [12] se introduce un modelo de programación lineal entera mixta para el ruteo y programación de flota heterogénea, las puertas del muelle asignadas, la secuencia del camión y el tiempo de viaje requeridos para movilizar los bienes. Se planteó una solución de un algoritmo de ramificación y acotamiento y heurísticas de barrido. En [13] se propone un problema de ruteo de vehículos con Cross-Docking, se formula un modelo matemático y se resuelve con una heurística de búsqueda de vecindades. En [74] se considera el problema de ruteo pick up and delivery (recogida y entrega simultáneas) en sistemas Cross-Docking. En [11] se aborda la programación de camiones para carga y descarga de operaciones en una plataforma Cross-Docking, con un modelo de programación entera mixta para la coordinación de un sistema sencillo de ruteo y Cross-Docking, con 70 clientes, 16 vehículos y 7 puertas de muelle.

Con respecto a cadena de suministro: en [7] se propone una nueva categoría de VRPCD-SCM (Vehicle Routing Problem with cross-docking in supply chain management) que consiste en satisfacer la demanda de los clientes con un mínimo costo de transporte.

En cuanto a localización: en [64] se refiere que los problemas de localización, ruteo y asignación con Cross-Docking, genera un diseño simultáneo de la ubicación del centro de distribución y el modelo de ruteo y asignación de vehículos. Presenta un modelo de programación entera mixta de dos etapas para localización y posteriormente el ruteo y asignación, contemplando la estrategia Cross-Docking. Se propone un nuevo algoritmo basado en un recocido simulado de dos etapas, a partir de una lista TABU. En [67] Se propone

Tabla 5.  
Clasificación de métodos de solución

Técnica de solución	Porcentaje
Meta-heurísticas	45%
Optimización	32%
Hibridación	5%
Heurísticas	9%
Inteligencia Artificial	9%

Fuente: Elaboración propia

un modelo de localización, programación y ruteo de vehículos con Cross-Docking en una cadena de suministro. Se resuelve mediante un algoritmo híbrido de recocido simulado y búsqueda tabú. En [69] se propone un trabajo que resuelve la localización de múltiples centros de Cross-Docking, además de programación de ruteo de vehículos; contemplando de esta manera los niveles de toma de decisiones estratégico, táctico y operativo para compañías logísticas. La solución propuesta consiste en un híbrido entre programación estocástica y lógica difusa.

La consolidación de red, se desarrolla un modelo de programación entera en [68], donde se emplean tres sistemas de transporte: embarque directo, embarque a través de Cross-Docking y distribución tradicional. Se plantea una hibridación entre una meta-heurística propuesta y un recocido simulado.

Y finalmente, lo ambiental se considera en [73], donde se estudia el problema de ruteo y Cross-Docking, se propone una nueva clasificación: Ruteo verde (green vehicle routing problem) de mínimo costo, con restricciones de emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente. Se desarrolla una meta-heurística de colonia de hormigas para la solución.

La Tabla 5 propone una clasificación en cinco categorías (Meta-heurísticas, optimización, hibridación, heurísticas e inteligencia artificial) con respecto a los métodos de solución, en la cual se evidencia que cerca de la mitad de los artículos revisados, aplican meta-heurísticas como estrategia para resolver este tipo de formulaciones.

Es novedoso el aporte de la inteligencia artificial como método de solución a este tipo de problemas de optimización combinatoria. Los métodos convencionales como las heurísticas de barrido y los algoritmos de ramificación y corte, siguen en vigencia a pesar de su bajo porcentaje de incidencia (9%) en las estrategias de resolución. La hibridación de técnicas meta-heurísticas presenta un buen nivel de aplicación (9%), con reportes de resultados positivos. El mayor interés de la literatura es en el campo de las Meta-heurísticas.

#### 4. Discusión

- A pesar de la gran cantidad de trabajos aportados por la literatura, referentes al ruteo de vehículos con *Cross-Docking*, son pocos los que abordan la incertidumbre de la demanda, lo que genera una oportunidad para investigaciones futuras.
- Las consideraciones de tipo ambiental, tales como la reducción de tiempos de recorrido y por lo tanto, de emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente, incluidas en formulaciones tipo *green vehicle routing* en sistemas *Cross-Docking*, son

también un tema poco desarrollado en la literatura revisada.

- Existe un amplio campo por explorar en el ruteo de vehículos y *Cross-Docking*, particularmente en aplicaciones en casos reales, donde los resultados se prueben en campo, con el fin de corroborar la aplicabilidad de este tipo de sistemas.

## 5. Conclusiones

- Un sistema *Cross-Docking* favorece la reducción de costos al minimizar las operaciones de almacenamiento y alistamiento de pedidos, sin embargo, esta técnica exige altos niveles de sincronización de los camiones en el despacho y llegadas en muelle, lo que se consigue a través del diseño y programación de rutas; con el fin de cumplir con los objetivos de una distribución eficiente.
- La inclusión de *Cross-Docking* a los problemas de ruteo, permitió el surgimiento de una nueva tipología de problemas: el VRP-CD (*Vehicle Routing Problem with Cross-Docking*) o problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking*, fuente de diversas aplicaciones en la distribución física de mercancías.
- Se observa un interés especial en los métodos de solución para los problemas de VRP-CD (*Vehicle Routing Problem with Cross-Docking*) o problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking*, a través de meta-heurísticas, esto debido a la complejidad computacional de este tipo de problemas de optimización combinatoria.
- Los modelos resueltos a partir de algoritmos de optimización, se aplican a problemas de talla pequeña y se utilizan preferentemente para programación y asignación de vehículos. Otras investigaciones abordan programación dinámica, redes de optimización e inteligencia artificial como métodos alternativos.
- Otro tipo de formulaciones enriquecidas de VRP-CD han surgido a partir del interés reciente en este tema, tales como: el VRPCD-SCM o el problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking* para la gestión de la cadena de suministro (*Vehicle routing problem with Cross-Docking supply chain management*), el VRPCD-SD (*Vehicle routing problem with Cross-Docking split and delivery*) o problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking* para entregas divididas, el VRPCD-PD (*Vehicle Routing Problem with Cross-Docking pickup and delivery*) o problema de ruteo de vehículos con *Cross-Docking* de recogida y entrega, el VRPSP-CZHTW o problema de programación de vehículos con zonas de clientes y ventanas duras de tiempo (*Vehicle routing schedulling problem with clients zones and hard time Windows*) y finalmente, el *Green* VRP-CD o problema de ruteo verde de vehículos con *Cross-Docking* (*Green vehicle routing problem with Cross-Docking*); los cuales se convierten en potenciales fuentes de investigación para otros autores.
- Existen brechas de conocimiento en este campo, especialmente en lo que respecta a aplicaciones donde se consideren algunas situaciones de incertidumbre: demandas aleatorias, retrasos por tráfico o condiciones climáticas, entre otras.
- La industria de los perecederos ofrece potencialidades de

aplicación de la estrategia *Cross-Docking*, puesto que la condición de menor tiempo de espera y mínima manipulación de productos, contribuye a un mejor tiempo de respuesta al cliente, garantizando la frescura de los productos y la reducción de mermas.

## Referencias

- [1] Stephan, K. and Boysen, N., Cross-docking. *Journal of Management Control*, 22(1), pp. 129-137, 2011. DOI: 10.1007/s00187-011-0124-9
- [2] Yin, P.-Y., Lyu, S.-R. and Chuang, Y.-L., Cooperative coevolutionary approach for integrated vehicle routing and scheduling using cross-dock buffering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 52, pp. 40-53, 2016. DOI: 10.1016/j.engappai.2016.02.006
- [3] Buijs, P., Vis, I. F. A. and Carlo, H.J., Synchronization in cross-docking networks: A research classification and framework. *European Journal of Operational Research*, 239(3), pp. 593-608, 2014. DOI: 10.1016/j.ejor.2014.03.012
- [4] Agustina, D., Lee, C. K. M. and Piplani, R., A review: mathematical models for cross docking planning. *International Journal of Engineering Business Management*, 2(2), pp. 47-54, 2010. DOI: 10.5772/9717
- [5] Mohtashami, A., Tavana, M., Santos-Arteaga, F.J. and Fallahian-Najafabadi, A., A novel multi-objective meta-heuristic model for solving cross-docking scheduling problems. *Applied Soft Computing Journal*, 31, pp. 30-47, 2015. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.02.030
- [6] Yu, V.F., Jewpanya, P. and Redi, A.A. N.P., Open vehicle routing problem with cross-docking. *Computers and Industrial Engineering*, 94, pp. 6-17, 2016. DOI: 10.1016/j.cie.2016.01.018
- [7] Dondo, R., Méndez, C.A. and Cerdá, J., The multi-echelon vehicle routing problem with cross docking in supply chain management. *Computers and Chemical Engineering*, 35(12), pp. 3002-3024, 2011. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.03.028
- [8] Dondo, R. and Cerdá, J., A sweep-heuristic based formulation for the vehicle routing problem with cross-docking. *Computers and Chemical Engineering*, 48, pp. 293-311, 2013. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.09.016
- [9] Chopra, S. and Meindl, P., *Supply Chain Management*. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.
- [10] Ross, A. and Jayaraman, V., An evaluation of new heuristics for the location of cross-docks distribution centers in supply chain network design. *Computers and Industrial Engineering*, 55(1), pp. 64-79, 2008. DOI: 10.1016/j.cie.2007.12.001
- [11] Dondo, R. and Cerdá, J., A monolithic approach to vehicle routing and operations scheduling of a cross-dock system with multiple dock doors. *Computers and Chemical Engineering*, 63, pp. 184-205, 2014. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.12.012
- [12] Dondo, R. and Cerdá, J., The heterogeneous vehicle routing and truck scheduling problem in a multi-door cross-dock system. *Computers and Chemical Engineering*, 76, pp. 42-62, 2015. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2015.02.003
- [13] Maknoon, Y. and Laporte, G., Vehicle routing with cross-dock selection. *Computers and Operations Research*, 77, pp. 254-266, 2017. DOI: 10.1016/j.cor.2016.08.007
- [14] adier, A.L. and Alpan, G., Cross-docking operations: Current research versus industry practice. *Omega (United Kingdom)*, 62, pp. 145-162, 2016. DOI: 10.1016/j.omega.2015.09.006
- [15] Van Belle, J., Valckenaers, P. and Cattrysse, D., Cross-docking: State of the art. *Omega*, 40(6), pp. 827-846, 2012. DOI: 10.1016/j.omega.2012.01.005
- [16] Agustina, D., Lee, C.K.M. and Piplani, R., Vehicle scheduling and routing at a cross docking center for food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 152, pp. 29-41, 2014. DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.01.002
- [17] Ahmadizar, F., Zeynivand, M. and Arkat, J., Two-level vehicle routing with cross-docking in a three-echelon supply chain: A genetic algorithm approach. *Applied Mathematical Modelling*, 39(22), pp. 7065-7081, 2015. DOI: 10.1016/j.apm.2015.03.005
- [18] Alpan, G., Ladier, A.L., Larbi, R. and Penz, B., Heuristic solutions for transshipment problems in a multiple door cross docking



- warehouse. *Computers and Industrial Engineering*, 61(2), pp. 402-408, 2011. DOI: 10.1016/j.cie.2010.09.010
- [19] Alpan, G., Larbi, R. and Penz, B., A bounded dynamic programming approach to schedule operations in a cross docking platform. *Computers and Industrial Engineering*, 60(3), pp. 385-396, 2011. DOI: 10.1016/j.cie.2010.08.012
- [20] Amini, A. and Tavakkoli-Moghaddam, R., A bi-objective truck scheduling problem in a cross-docking center with probability of breakdown for trucks. *Computers and Industrial Engineering*, 96, pp. 180-191, 2016. DOI: 10.1016/j.cie.2016.03.023
- [21] Assadi, M. T. and Bagheri, M., Differential evolution and population-based simulated annealing for truck scheduling problem in multiple door cross-docking systems. *Computers and Industrial Engineering*, 96, pp. 149-161, 2016. DOI: 10.1016/j.cie.2016.03.021
- [22] Van Belle, J., Saint Germain, B., Philips, J., Valckenaers, P. and Cattrysse, D., Cooperation between a holonic logistics execution system and a vehicle routing scheduling system. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 46(7), pp. 41-46, 2013. DOI: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00051
- [23] Boloori-Arabani, A., Zandieh, M. and Ghomi, S.M.T.F., Multi-objective genetic-based algorithms for a cross-docking scheduling problem. *Applied Soft Computing Journal*, 11(8), pp. 4954-4970, 2011. DOI: 10.1016/j.asoc.2011.06.004
- [24] Boloori-Arabani, A.R., Fatemi-Ghomi, S.M.T. and Zandieh, M., Meta-heuristics implementation for scheduling of trucks in a cross-docking system with temporary storage. *Expert Systems with Applications*, 38(3), pp. 1964-1979, 2011. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.07.130
- [25] Buijs, P., Szirik, N.B., Meyer, G.G. and Wortmann, J.C., Situation awareness for improved operational control in cross docks: An illustrative case study. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, Bucharest, Romania, 2012. pp. 1196-1201. DOI: 10.3182/20120523-3-RO-2023.00080
- [26] Chen, F. and Song, K., Minimizing makespan in two-stage hybrid cross docking scheduling problem. *Computers and Operations Research*, 36(6), pp. 2066-2073, 2009. DOI: 10.1016/j.cor.2008.07.003
- [27] Chen, M.C., Hsiao, Y.H., Himadeep-Reddy, R. and Tiwari, M.K., The self-learning particle swarm optimization approach for routing pickup and delivery of multiple products with material handling in multiple cross-docks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 91, pp. 208-226, 2016. DOI: 10.1016/j.tre.2016.04.003
- [28] Cóccola, M.E., Méndez, C.A., Zamarripa, M. and Espuña, A., Integrated production and distribution management with cross docking in supply chains. In *Computer Aided Chemical Engineering*, 31, pp. 1050-1054, 2012. DOI: 10.1016/B978-0-444-59506-5.50041-9
- [29] Gelareh, S., Monemi, R.N., Semet, F. and Goncalves, G., A branch-and-cut algorithm for the truck dock assignment problem with operational time constraints. *European Journal of Operational Research*, 249(3), pp. 1144-1152, 2016. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.09.049
- [30] Hanchuan, P., Ruifang, W., Hao, D. and Feng, Z., The Research of logistics cost and influencing factors based on cross docking. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, pp. 1812-1817, 2013. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.08.206
- [31] Hermel, D., Hasheminia, H., Adler, N. and Fry, M.J., A solution framework for the multi-mode resource-constrained cross-dock scheduling problem. *Omega (United Kingdom)*, 59, pp. 157-170, 2016. DOI: 10.1016/j.omega.2015.06.002
- [32] Horta, M., Coelho, F. and Relvas, S., Layout design modelling for a real world just-in-time warehouse. *Computers and Industrial Engineering*, 101, pp. 1-9, 2016. DOI: 10.1016/j.cie.2016.08.013
- [33] Kalenatic, D., López-Bello, C.A., González Rodríguez, L.J. y Rueda-Velasco F.J., Modelo para la localización de un plataforma de cross docking en el contexto de logística focalizada. *Revista de Ingeniería [Online]*. 13(2), pp. 36-44, 2008. [date of reference October 25th of 2016]. Available at: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/2668>
- [34] Keshtzari, M., Naderi, B. and Mehdizadeh, E., An improved mathematical model and a hybrid metaheuristic for truck scheduling in cross-dock problems. *Computers and Industrial Engineering*, 91, pp. 197-204, 2016. DOI: 10.1016/j.cie.2015.11.006
- [35] Konur, D. and Golias, M.M., Analysis of different approaches to cross-dock truck scheduling with truck arrival time uncertainty. *Computers and Industrial Engineering*, 65(4), pp. 663-672, 2013. DOI: 10.1016/j.cie.2013.05.009
- [36] Kuo, Y., Optimizing truck sequencing and truck dock assignment in a cross docking system. *Expert Systems with Applications*, 40(14), pp. 5532-5541, 2013. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.04.019
- [37] Ladier, A.L. and Alpan, G., Robust cross-dock scheduling with time windows. *Computers and Industrial Engineering*, 99, pp. 16-28, 2016. DOI: 10.1016/j.cie.2016.07.003
- [38] Larbi, R., Alpan, G., Baptiste, P. and Penz, B., Scheduling cross docking operations under full, partial and no information on inbound arrivals. *Computers and Operations Research*, 38(6), pp. 889-900, 2011. DOI: 10.1016/j.cor.2010.10.003
- [39] Liao, T.W., Egbelu, P.J. and Chang, P.C., Simultaneous dock assignment and sequencing of inbound trucks under a fixed outbound truck schedule in multi-door cross docking operations. *International Journal of Production Economics*, 141(1), pp. 212-229, 2013. DOI: 10.1016/j.ijpe.2012.03.037
- [40] Madani-Isfahani, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Naderi, B., Multiple cross-docks scheduling using two meta-heuristic algorithms. *Computers and Industrial Engineering*, 74(1), pp. 129-138, 2014. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.009
- [41] Maknoon, M.Y., Kone, O. and Baptiste, P., A sequential priority-based heuristic for scheduling material handling in a satellite cross-dock. *Computers and Industrial Engineering*, 72(1), pp. 43-49, 2014. DOI: 10.1016/j.cie.2014.03.002
- [42] Maknoon, M.Y., Soumis, F. and Baptiste, P., Optimizing transshipment workloads in less-than-truckload cross-docks. *International Journal of Production Economics*, 179, pp. 90-100, 2016. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.05.015
- [43] Mohtashami, A., A novel dynamic genetic algorithm-based method for vehicle scheduling in cross docking systems with frequent unloading operation. *Computers and Industrial Engineering*, 90, pp. 221-240, 2015. DOI: 10.1016/j.cie.2015.09.008
- [44] Mohtashami, A., Scheduling trucks in cross docking systems with temporary storage and repetitive pattern for shipping trucks. *Applied Soft Computing*, 36, pp. 468-486, 2015. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.07.021
- [45] Musa, R., Arnaout, J.-P. and Jung, H., Ant colony optimization algorithm to solve for the transportation problem of cross-docking network. *Computers and Industrial Engineering*, 59(1), pp. 85-92, 2010. DOI: 10.1016/j.cie.2010.03.002
- [46] Oh, Y., Hwang, H., Cha, C.N. and Lee, S., A dock-door assignment problem for the Korean mail distribution center. *Computers and Industrial Engineering*, 51(2), pp. 288-296, 2006. DOI: 10.1016/j.cie.2006.02.009
- [47] Pawlewski, P., Asynchronous multimodal process approach to cross-docking hub optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), pp. 2127-2132, 2015. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.403
- [48] Rahmazadeh-Tootkaleh, S., Fatemi-Ghomi, S.M.T. and Sheikh Sajadieh, M., Cross dock scheduling with fixed outbound trucks departure times under substitution condition. *Computers and Industrial Engineering*, 92, pp. 50-56, 2016. DOI: 10.1016/j.cie.2015.12.005
- [49] Saliez, Y., Berger, T., Bonte, T. and Trentesaux, D., Proposition of a hybrid control architecture for the routing in a physical Internet cross-docking hub. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), pp. 1978-1983, 2015. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.378
- [50] Serrano, C., Moral, J., Delorme, X. and Dolgui, A., Cross-docking operation scheduling: Truck arrivals, shop-floor activities and truck departures. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), pp. 1353-1358, 2016. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.751
- [51] Shi, W., Liu, Z., Shang, J. and Cui, Y., Multi-criteria robust design of a JIT-based cross-docking distribution center for an auto parts supply chain. *European Journal of Operational Research*, 229(3), pp. 695-706, 2013. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.03.013

- [52] Soto-Zuluaga, J.P., Thiell, M. and Colomé-Perales, R., Reverse cross-docking. *Omega (United Kingdom)*, 66, pp. 48-57, 2017. DOI: 10.1016/j.omega.2016.01.010
- [53] Trouillet, B., Petri net model and mathematical resolution for cross docking. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, pp. 246-251, 2010. DOI: 10.3182/20100701-2-PT-4011.00043
- [54] Vahdani, B. and Zandieh, M., Scheduling trucks in cross-docking systems: Robust meta-heuristics. *Computers and Industrial Engineering*, 58(1), pp. 12-24, 2010. DOI: 10.1016/j.cie.2009.06.006
- [55] Van-Belle, J., Valckenaers, P. Vanden Berghe, G. and Cattrysse, D., A tabu search approach to the truck scheduling problem with multiple docks and time windows. *Computers and Industrial Engineering*, 66(4), pp. 818-826, 2013. DOI: 10.1016/j.cie.2013.09.024
- [56] Vis, I.F.A. and Roodbergen, K.J., Positioning of goods in a cross-docking environment. *Computers and Industrial Engineering*, 54(3), pp. 677-689, 2008. DOI: 10.1016/j.cie.2007.10.004
- [57] Vis, I.F.A. and Roodbergen, K.J., Layout and control policies for cross docking operations. *Computers and Industrial Engineering*, 61(4), pp. 911-919, 2011. DOI: 10.1016/j.cie.2011.06.001
- [58] Yan, H. and Tang, S.L., Pre-distribution and post-distribution cross-docking operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(6), pp. 843-859, 2009. DOI: 10.1016/j.tre.2009.05.005
- [59] Morais, V.W.C., Mateus, G.R. and Noronha, T.F., Iterated local search heuristics for the vehicle routing problem with cross-docking. *Expert Systems with Applications*, 41(16), pp. 7495-7506, 2014. DOI: 10.1016/j.eswa.2014.06.010
- [60] Lee, Y.H., Jung, J.W. and Lee, K.M., Vehicle routing scheduling for cross - docking in the supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 51(2), pp. 246-256, 2006. DOI: 10.1016/j.cie.2006.02.006
- [61] Yu, V.F., Jewpanya, P. and Redi, A.A.N.P., A simulated annealing heuristic for the vehicle routing problem with cross-docking. *logistics operations, Supply Chain Management and Sustainability*, New York, Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-07287-6
- [62] Santos, F.A., Mateus, G.R. and da Cunha, A.S., A novel column generation algorithm for the vehicle routing problem with cross-docking. *Network Optimization*, pp. 412-425, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-21527-8\_47
- [63] Hasani-Goodarzi, A. and Tavakkoli-Moghaddam, R., Capacitated vehicle routing problem for multi-product cross- docking with split deliveries and pickups. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 62(2010), pp. 1360-1365, 2012. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.232
- [64] Mousavi, S.M., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Jolai, F., A possibilistic programming approach for the location problem of multiple cross-docks and vehicle routing scheduling under uncertainty. *Engineering Optimization*, 45(10), pp. 1223-1249, 2013. DOI: 10.1080/0305215X.2012.729053
- [65] Santos, F.A., Mateus, G.R. and Da Cunha, A.S., The pickup and delivery problem with cross-docking. *Computers and Operations Research*, 40(4), pp. 1085-1093, 2013. DOI: 10.1016/j.cor.2012.11.021
- [66] Moghadam, S.S., Ghomi, S.M.T.F. and Karimi, B., Vehicle routing scheduling problem with cross docking and split deliveries. *Computers and Chemical Engineering*, 69, pp. 98-107, 2014. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2014.06.015
- [67] Mousavi, S.M. and Tavakkoli-Moghaddam, R., A hybrid simulated annealing algorithm for location and routing scheduling problems with cross-docking in the supply chain. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(2), pp. 335-347, 2013. DOI: 10.1016/j.jmsy.2012.12.002
- [68] Hosseini, S.D., Akbarpour-Shirazi, M. and Karimi, B., Cross-docking and milk run logistics in a consolidation network: A hybrid of harmony search and simulated annealing approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), pp. 567-577, 2014. DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.05.004
- [69] Mousavi, S.M., Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R. and Hashemi, H., Location of cross-docking centers and vehicle routing scheduling under uncertainty: A fuzzy possibilistic-stochastic programming model, *Appl. Math. Model.*, 38(7-8), pp. 2249-2264, 2014.
- [70] Küçükoğlu, İ. and Öztürk, N., Simulated annealing approach for transportation problem of cross-docking network design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 109(2012), pp. 1180-1184, 2014. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.12.608
- [71] Mohtashami, A., Scheduling trucks in cross docking systems with temporary storage and repetitive pattern for shipping trucks. *Applied Soft Computing*, 36, pp. 468-486, 2015. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.07.021
- [72] Mokhtarinjad, M., Ahmadi, A., Karimi, B. and Rahmati, S.H.A., A novel learning based approach for a new integrated location-routing and scheduling problem within cross-docking considering direct shipment. *Applied Soft Computing Journal*, 34, pp. 274-285, 2015. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.04.062
- [73] Yin, P.Y. and Chuang, Y.L., Adaptive memory artificial bee colony algorithm for green vehicle routing with cross-docking. *Applied Mathematical Modelling*, 40(21), pp. 9302-9315, 2014. DOI: 10.1016/j.apm.2016.06.013
- [74] Nikolopoulou, A.I., Repoussis, P.P., Tarantilis, C.D. and Zachariadis, E.E., Moving products between location pairs: Cross-docking versus direct-shipping. *European Journal of Operational Research*, 256(3), pp. 803-819, 2017. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.06.053

**E.C. Gonzalez-La Rotta**, es MSc. en Ing. Industrial, Esp. en Educación Matemática e Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia). Docente investigadora de la Universidad Católica de Colombia (Bogotá, Colombia), en las áreas de investigación de operaciones, producción y gestión de proyectos. Actualmente es candidata a Dra. en Ingeniería de Procesos de la Universidad EAN (Bogotá, Colombia). ORCID: 0000-0002-7054-5386

**M. Becerra-F**, es MSc. en Ing. Industrial, Ing. de Producción y Tec. Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia). Docente investigador de la Universidad Católica de Colombia (Bogotá, Colombia), en las áreas de producción, logística, cadenas de suministro, investigación de operaciones, modelado, simulación discreta y simulación continua. Líder del Grupo de Investigación en Producción GIP. Actualmente es candidato a Dr. en Modelado en Política y Gestión Pública de la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Bogotá, Colombia) y PhD (c) in Model Based Public Planning, Policy Design and Management Candidate, University of Palermo (Palermo, Italia). ORCID: 0000-0003-1060-2198