

# Operaciones en terminales de contenedores: una revisión de la literatura

Darwin Peña-González, Universidad Del Magdalena-Colombia

**Resumen** - El énfasis de este artículo, que analiza las actividades de la terminal de contenedores, está en las características de optimizar las operaciones de la terminal de contenedores. Se realiza un estudio de la literatura utilizando una taxonomía que engloba temas vinculados a la investigación sobre optimización de operaciones en terminales de contenedores y modelos que se utilizan para abordar las dificultades generadas en estas áreas de actividades, los cuales fueron construidos para llenar vacíos en la taxonomía propuesta.

**Índice de Términos** – Logística, optimización, puertos marítimos, secuenciación de proyectos con recursos limitados

## I. INTRODUCCION

No hay duda que el transporte internacional es un elemento clave en la logística del comercio exterior, puesto que garantiza el desplazamiento físico del producto desde el lugar de generación del valor, hasta el mercado donde los consumidores lo adquirirán, en este sentido, la competitividad entre los puertos marítimos propiciado por el comercio internacional, ha permitido avanzar a una economía más sólida [1]. Muchas de las dificultades que afrontan hoy día los puertos debido a la globalización de los mercados, está relacionado con la optimización de las labores o conjunto de trabajos, como lo muestran en sus investigaciones, Briskorn, Drexl, & Hartmann [2], Dekker, Voogd, & Asperen [3] y Hartmann [4], que podrían ser tareas de transporte u otras actividades las cuales deben ser programadas respetando las restricciones de precedencia y recursos, por ejemplo, el almacenamiento de contenedores especiales, estudiados por Hartmann y otros [5] (trabajo relacionado con contenedores refrigerados), el atraque de buques (Berth Allocation Problem, BAP) Hartmann y otros [6], Imai y otros [7], la infraestructura portuaria sostenible mostrada

por Pavlic y otros [8], y la asignación de espacio en los patios de almacenamiento de terminales estudiada por Zhang y otros [9], entre otros.

En este proceso de optimización, algunos modelos son abordados desde el problema de secuenciación de proyectos con recursos limitados modo único de ejecución de actividades, el cual ha sido ampliamente estudiado en la literatura [10]. Entre los más divulgados son Pritsker y otros [11], Kaplan [12], Alvarez y otros [13], Mingozzi y otros [14] y Hartmann y otros [6], Hartmann [4] para el caso de la aplicación en puertos, entre otros. En este trabajo se presentan en la primera parte las actividades en terminales de contenedores (ATC), en la segunda parte, la optimización de sus principales operaciones, en la tercera parte se introducen definiciones y conceptos de secuenciación de proyectos con recursos limitados. Finalmente se realiza una taxonomía de las investigaciones realizadas sobre optimización de operaciones en terminales de contenedores con sus respectivos modelos de solución, utilizando una adaptación de la metodología de revisión de la literatura realizada por Burak y otros [15].

## II. ACTIVIDADES EN TERMINALES DE CONTENEDORES (ATC)

### A. *El comercio mundial de contenedores*

Desde su creación después de la primera mitad del siglo XX, pocas cosas han cambiado el comercio mundial de forma tan dramática como el contenedor marítimo, esa caja de metal modular resistente a la corrosión y de construcción hermética a partir de la cual se han fabricado decenas de millones desde su invención después de la primera parte del siglo XX. Los contenedores de 20 y 40 pies son los dos tipos más populares.

Tabla I

Estimación actividad de trasbordo de contenedores por región (volúmenes de transbordo e incidencia)

Región	2000		2007		2012	
	000	TEU %	000	TEU %	000	TEU %
América del Norte	1,908	3,3	2,774	2	2,67	1,5
Europa del Norte	6,376	11	13,276	9,6	14,739	8,4
Europa del Sur	7,071	12,2	15,525	11,3	18,956	10,9
Lejano Oriente	14,405	24,9	37,917	27,5	48,917	28
Sudeste de Asia	16,413	28,4	35,217	25,5	44,107	25,3
Medio Oriente	4,653	8	12,794	9,3	16,761	9,6
América Latina	3,97	6,9	10,926	7,9	15,181	8,7
Oceanía	160	0,3	469	0,3	542	0,3
Asia del Sur	1,186	2	2,816	2	3,56	2
África	1,716	3	4,896	3,6	8,199	4,7
Europa Oriental	7	0	1,283	0,9	1,016	0,6
El Mundo	57,865		137,893		174,648	

Fuente: The Portopia Consortium [16]

Es importante resaltar que el número de estas cajas metálicas que se han transportado llenos por mar para el año 2014 a escala global, fue estimada en 182 millones, pero se estima que la cantidad de movimientos de contenedores en los puertos fue más de 2,5 veces superior, lo cual significa que se producen muchas recolocaciones de contenedores vacíos. Por otra parte, se destaca que la carga contenedorizada representa más de la mitad del valor de todo el tráfico marítimo internacional [17]. Esto se ve reflejado en la economía mundial, cuyo desarrollo en el tráfico portuario de contenedores ha aumentado marginalmente, el cual se sitúa aproximadamente en el 71,9%. Esta tendencia sigue manteniendo un crecimiento gradual de la participación de los países en desarrollo en el tráfico mundial de contenedores debido al aumento del comercio Sur-Sur como se muestra en la tabla I.

En la tabla II se muestran los 20 puertos principales en el periodo 2012-2014, los cuales representaban aproximadamente el 45,7% del tráfico portuario de contenedores de todo el mundo. En su conjunto, estos puertos registraron un aumento del 4,5% del tráfico con respecto a 2013, porcentaje similar al estimado para 2013. La lista está compuesta por 16 puertos de economías en transición, todos de Asia; los otros 4 puertos están en países desarrollados (3 en Europa y 1 en América del Norte). Los 10 puertos principales se encuentran en Asia, lo que pone de manifiesto la importancia de la región como centro de manufactura.

Tabla II

Las 20 principales terminales de contenedores y su tráfico en 2012-2014 (en TEU)

Puerto	2000	2013	2014
Shanghái	32 529 000	36 617 000	35 290 000
Singapur	31 649 400	32 600 000	33 869 000
Shenzhen	22 940 130	23 279 000	24 040 000
Hong Kong	23 117 000	22 352 000	22 200 000
Ningbo	15 670 000	17 351 000	19 450 000
Busan	17 046 177	17 686 000	18 678 000
Guangzhou	14 743 600	15 309 000	16 610 000
Qingdao	14 503 000	15 520 000	16 580 000
Dubai	13 270 000	13 641 000	15 200 000
Rotterdam	11 865 916	11 621 000	12 298 000
Port Klang	10 001 495	10 350 000	10 946 000
Kaohsiung	9 781 221	9 938 000	10 593 000
Dalian	8 064 000	10 015 000	10 130 000
Hamburgo	8 863 896	9 258 000	9 729 000
Amberes	8 635 169	8 578 000	8 978 000
Xiamen	7 201 700	8 008 000	8 572 000
Tanjung Pelepas	7 700 000	7 628 000	8 500 000
Los Ángeles	8 077 714	7 869 000	8 340 000
Yakarta	6 100 000	6 171 000	6 053 000
Total	284 059 418	296 791 000	310 116 000

Fuente: Secretaría de la UNCTAD [17]

Lo anterior muestra que el contenedor ha favorecido una auténtica integración entre los modos de transporte, principalmente entre mar y tierra dicha distribución es actualmente un proceso único global. Este proceso ha permitido disminuir el costo de los seguros en el transporte al reducir la incertidumbre en la entrega de las mercancías y los riesgos de daños en las mismas. Del mismo modo, ha permitido la instalación de fábricas en cualquier parte del mundo, ya que, en el pasado la localización de muchas industrias se hacía indispensable la cercanía a puertos, ríos o estaciones de tren, sin embargo, el bajo costo del transporte multimodal ha hecho innecesaria dicha proximidad. Las cifras presentadas en las tablas I y II muestran, a grandes rasgos, que la introducción de los contenedores al comercio internacional ha jugado un papel clave para la globalización, debido al impulso y fomento del desarrollo económico que este le ha dado. Estas simples cajas de metal han revolucionado el comercio internacional, haciendo al mundo más pequeño y a la economía mundial más grande.

### III. PRINCIPALES ACTIVIDADES EN TERMINALES DE CONTENEDORES

Las terminales portuarias juegan un papel fundamental en el transporte mundial de mercancías en contenedores, ya que son el punto de conexión entre los transportes marítimos y terrestres. En las terminales portuarias de contenedores, se distinguen tres zonas como se aprecia en la figura 1 y se describen en [18]:

- Lado del mar. Es dónde atracan los buques para ser cargados o descargados por las grúas de puerto.
- Patio de contenedores. Se usa para el almacenamiento temporal de los contenedores, que serán transferidos a una de las otras zonas, haciendo que la gestión de ésta sea de gran interés y la más estudiada en la literatura científica.
- Zona de transferencia a medios terrestres. Esta zona es el punto de conexión entre las cadenas de distribución terrestres, en las que los contenedores son transportados por camiones y trenes, y el patio de la terminal de contenedores.

Como se muestra en la figura 2, el patio de contenedores consiste en un conjunto de bloques, formado por bahías que contienen un conjunto de pilas en las que diferenciamos distintas alturas. En el patio, los contenedores son manipulados por las grúas de patio (yard cranes), que se encargan de mover los contenedores dentro de los bloques. Los movimientos que puede realizar una de estas grúas, van desde el apilamiento o adición de contenedores que llegan al bloque, hasta la extracción de estos, pasando por movimientos de recolocación, que consisten en cambiar un contenedor de la parte alta de una pila a otra, siempre dentro de un mismo bloque.

El manejo de los contenedores en el patio de la terminal portuaria tiene una implicación directa en el nivel de servicio ofrecido. Los contenedores de exportación deben estar disponibles inmediatamente para no producir tiempos de espera en los medios de transporte terrestres, así como en los buques portacontenedores. La organización de los contenedores en las pilas del patio influye directamente en la productividad de la terminal. Recolocarse los contenedores o tener en cuenta qué contenedores tienen preferencia, permite aumentar la productividad, reduciendo el tiempo de espera de los medios que transportarán las mercancías. Estas tareas son complejas debido a que se han de controlar muchos aspectos variables, como la prioridad de retirada de los contenedores almacenados, que depende de la planeación de las compañías de transporte, o saber qué pila es mejor para colocar un contenedor minimizando el número de recolocaciones futuras, dificultando la planificación manual en cuanto a efectividad y tiempo. Una buena descripción de las ATC se observa en [19].

Estas ATC difieren respecto al resto de terminales portuarias, ya que pueden alcanzar un alto grado de sistematización debido a: la estandarización del elemento transportado, el contenedor, la estandarización en la forma de manipulación portuaria, el altísimo nivel de

intercambios que se precisan, y la importante repercusión que representa la tecnología para la rentabilidad de la terminal [20].

Lo anterior muestra que el objetivo esencial de una terminal de contenedores (TC) es proporcionar los medios y la organización necesarios para que el intercambio de contenedor entre los modos de transporte terrestre y marítimo se produzca en las mejores condiciones de rapidez, eficiencia, seguridad. La literatura muestra investigaciones sobre operaciones en una TC, como la revisión realizada por Carlo y otros [19], la cual muestra una visión general detallada de las operaciones de transporte y del equipo de manipulación de materiales utilizado, proponen la utilización de un nuevo esquema de clasificación para las operaciones de transporte y plantean la discusión de los actuales paradigmas operacionales de las operaciones de transporte, además de las nuevas vías de investigación basadas en las tendencias y desarrollos actuales en la industria.

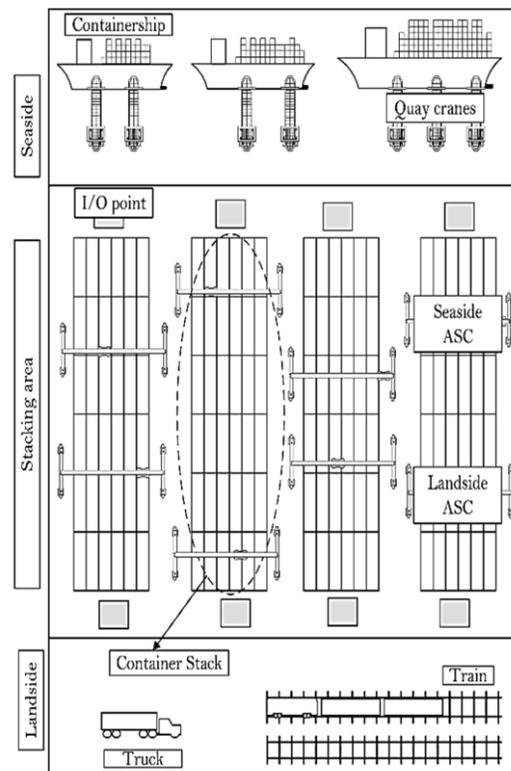


Fig. 1: Esquema de una terminal de contenedores Imagen tomada de Hossein y otros [21]

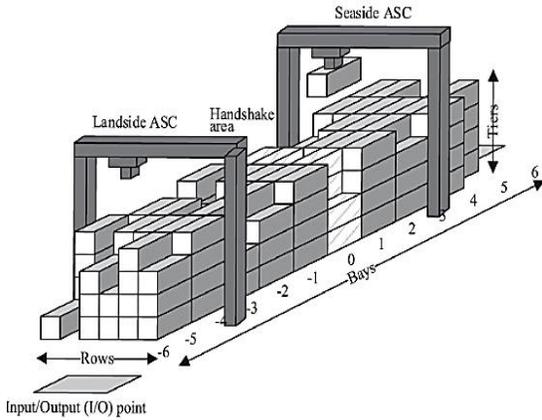


Fig. 2: Organización del patio de contenedores de una terminal

Imagen tomada de Hossein y otros [21]

Una búsqueda realizada en el portal PortEconomics (<http://www.porteconomics.eu/portdatabase>) cuya amplia base de datos PortStudies dedicada a catalogar todos los documentos que estudian la economía de puertos, políticas, gestión y que han sido publicados en revistas científicas internacionales desde la década de los 50's, muestra en los últimos 4 años, investigaciones realizadas particularmente en el tema de las ATC. En la tabla III se muestra una breve descripción de estos trabajos.

Tabla III  
Investigaciones realizadas entorno a ATC

Autor (es)	Descripción de la investigación realizada
Yang and Lin [22]	Destaca el equipo de manipulación de contenedores y compara métodos
Wilmsmeier y otros [23]	Realiza un análisis sobre productividad de la terminal y la eficiencia de esta
Xu y otros [24]	Discute la mejora de las operaciones de servicio en las TC desde las perspectivas de los requerimientos de los usuarios
Imai y otros [25]	Modela el problema de asignación de atraque para diferentes diseños de TC
Lättilä y otros [26]	Analiza los impactos de los puertos secos en un contexto finlandés
Song and Cui [27]	Analiza el cambio de productividad y su descomposición en TC costeros chinos durante 2006-2011
Nicoletti y otros [28]	Propone un enfoque híbrido basado en simulación y algoritmos genéticos para investigar el tiempo de respuesta de los buques en un TC real en diferentes escenarios caracterizados por el incremento en el tráfico de contenedores y en el tráfico de buques
Chang y otros [29]	Analiza el rendimiento de una serie de TC supervisados por una empresa de transporte de línea
Chiu y otros [30]	Este estudio examina los factores determinantes de la selección de alternativas de colaboración estratégica en las operaciones de la TC, específicamente en el puerto de Kaohsiung
Felício y otros [31]	Este estudio investiga las características de los puertos y TC, y evalúa cómo afectan al rendimiento

Phan & Kim [32]	Formulación matemática para suavizar los picos de las llegadas teniendo en cuenta la inconveniencia de camiones de cambiar sus horarios de llegada y el costo de espera de los camiones en las horas pico
Schmidt y otros [33]	Uso de AGV eléctricos de batería en TC, evaluación del potencial y la optimización de la viabilidad económica
Yang [34]	Este estudio se aplica tanto analítica proceso de jerarquía (AHP) y el análisis relacional gris (GRA), en operación de la TC desde una perspectiva verde
Serra y otros [35]	Analiza las regulaciones laborales en los TC italianos y evalúa los efectos de una mayor flexibilidad laboral a nivel operativo
Huang y otros [36]	Este estudio consiste en el complejo en torno de la gestión de la TC en el marco del problema de múltiples clientes a través el caso de los terminales del este asiático.
Gharehgozli & Koster [37]	Revisión de artículos que usan modelos OR para tomar o evaluar decisiones en TC
Lu y otros [38]	Estudia la gestión de la cadena de suministro sostenible

Fuente: Elaboración propia

#### IV. EL PROCESO DE BÚSQUEDA DE LA LITERATURA

En las bases de datos especializadas se realizaron búsquedas usando las palabras “scheduling problem and container terminal” como frase de búsqueda en las diferentes colecciones, tales como ACM Digital Library, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Emerald Journals (Emerald Group Publishing), HAL (CCSD), Health Reference Center Academic (Gale), Hindawi Journals, HKIR - selected records, INFORMS Journals, JSTOR Archival Journals, MEDLINE/ PubMed (NLM), OneFile (GALE), Palgrave Macmillan Journals, Science Citation Index Expanded (Web of Science), ScienceDirect Journals (Elsevier), Scopus (Elsevier), Social Sciences Citation Index (Web of Science), SpringerLink, SpringerLink Open Access, Taylor & Francis Online - Journals, Wiley Online Library. Para este estudio se eliminaron las referencias bibliográficas a los estudios en idiomas distintos al inglés. Este proceso de búsqueda se realizó tomando parte de la metodología de clasificación de la literatura utilizada por Burak et. al [15]. Por otra parte, en la figura 3, se visualiza seguimiento metodológico de la revisión presentada.

Las estadísticas que se presentan incluyen los artículos en las diferentes colecciones desde la década de los 90's hasta la actualidad (2016) suman un total de 1386 documentos, mostrando un repunte en publicaciones en el último lustro. Con la mejora de algoritmos, heurísticas y el poder computacional en el cálculo, permitieron a los investigadores resolver problemas, cada vez mayores, en la OOTC. Como resultado de esto, el número de artículos publicados en esta área durante la década del 2000 y la primera parte de la actual década del 2010 se incrementó

significativamente como lo muestra la figura 4.

Los métodos de cálculo para obtener soluciones llevaron al desarrollo de nuevos campos como los metaheurísticos y heurísticos, que proporcionan buenas soluciones en tiempo real, este proceso requiere altas habilidades de programación. Búsqueda tabú, algoritmos evolutivos, y otros algoritmos de búsqueda surgieron y han sido ampliamente utilizados en la optimización de tareas en TC durante la última década (ver tabla III). Los nombres de los investigadores que aparecen con mayor frecuencia en el estudio son Chew, Ek Peng (9), Lee, Loo Hay (8), Zhen, Lu (7), Chew, Ek (7), Boysen, Nils (6).

El crecimiento de la literatura es casi perfectamente exponencial con una tasa de crecimiento anual del 16,95% (Número de publicaciones =  $2,3206e^{0,1695t}$ ). Esto muestra un buen crecimiento en este tipo de estudios, en comparación con estudios o disciplinas de crecimiento contemporáneo, por ejemplo, análisis envolvente de datos (DEA) que tiene una tasa de 25,5%, línea de flujo de programación con el 15,1%, enrutamiento de vehículos con 6,09% [15] entre otros. Esta tasa de incremento puede explicarse quizás a que la solución de los problemas, requieren mucha más sofisticación en software y hardware los cuales han evolucionado en los últimos tiempos. El mayor número de artículos publicados durante un año fue en el 2015 con un total de 194 que equivale al 14% de todas las publicaciones con arbitraje entre 1990 y 2016

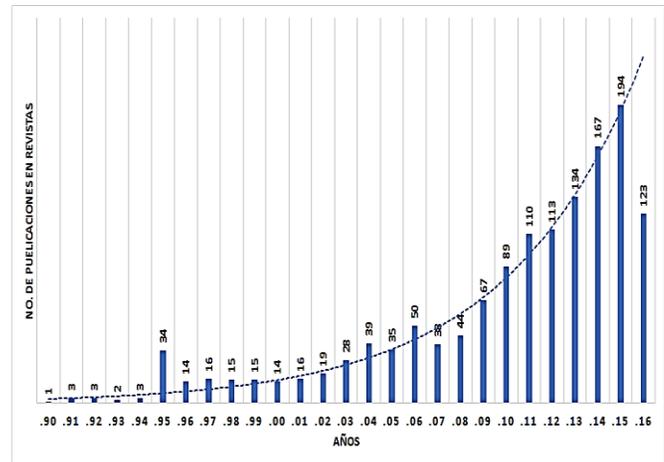


Fig. 4: Número de artículos publicados en revistas con arbitraje 1990-2016

Fuente: Elaboración propia

### V. PRINCIPALES PRODUCTOS DE ARTÍCULOS Y LAS REVISTAS ELEGIDAS

En la tabla IV, se toman las principales revistas y se ordenan de forma descendente del número total de artículos publicados sobre “scheduling problem and container terminal”. De esto se puede ver que Transportation Research Part E, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, European Journal of Operational Research, son las revistas de preferencia para los autores. Estas representan el 34% de todos los artículos publicados de las 729 seleccionadas de los años 90’s hasta al año 2016. Es más, se observa que las cinco primeras revistas en la tabla IV representan el 51% de la literatura y las diez primeras revistas el 77%. De la misma tabla IV se tomarán 46 artículos, los cuales fueron seleccionados adicionando a la búsqueda anterior la frase “Resource Constrained Project Scheduling Problem”, el cual haremos su análisis en el apartado final de este documento.

### VI. SECUENCIACIÓN DE PROYECTOS CON RECURSOS LIMITADOS

La secuenciación de proyectos con recursos limitados es un tipo de modelo que representa una amplia gama de situaciones reales. Para este estudio en particular los procesos a optimizar se centrarán en algunas de las actividades de un puerto marítimo. Para esto, se empezará conceptualizando alrededor del tema planteado, en este sentido, la literatura muestra diversas definiciones y conceptos sobre proyectos, una de estas definiciones es aceptada en dicho contexto como se muestra en ISO 8402

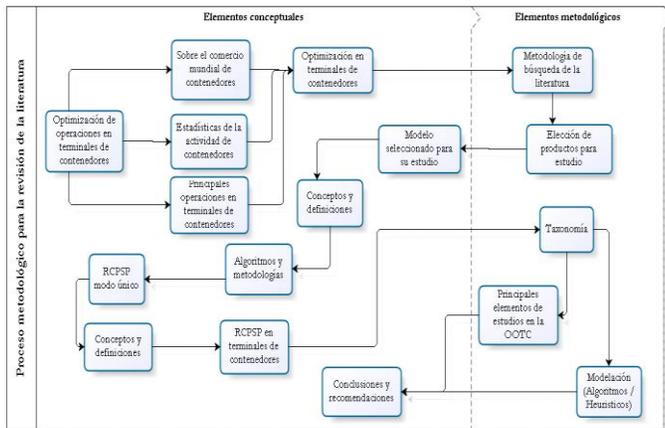


Fig. 3: Proceso metodológico para la revisión de la literatura

Fuente: Elaboración propia. figura realizada en Bizagi Modeler ver. 2.9.0.4

(1990) y expresada por Demeulemeester [39].

Las actividades o conjuntos de actividades que forman parte del proyecto tienen un tiempo de duración y además requieren recursos para su ejecución, los cuales son de disponibilidad limitada. Así mismo, se deben cumplir todas las relaciones temporales existentes entre ellas. Esto determina que la ejecución de las actividades no sea una tarea trivial. Además, las actividades tienen un único modo de ejecución, con una duración determinada y un consumo dado de recursos [40]. Otra clase de problema se genera cuando las actividades presentan distintos modos de ejecución, lo que implica afirmar que cada una de las actividades puede presentar distintas posibilidades o diferentes maneras de hacerse. Cabe destacar, que un modo no es más que una forma de ejecutar la actividad que está asociada a una determinada duración y un determinado consumo de recursos, donde pueden aparecer recursos no renovables y doblemente limitados.

Tabla IV

Listado de artículos con respecto a las publicaciones académicas

Título de la revista	Conteo
Transportation Research Part E	84
Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	83
European Journal of Operational Research	81
Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review	76
Computers & Industrial Engineering	49
Computers & Industrial Engineering	47
Or Spectrum	46
International Journal of Production Economics	33
Transportation Science	31
Computers & Operations Research	30
Mathematical Problems in Engineering	29
Flexible Services and Manufacturing Journal	26
Transportation Research Part B: Methodological	25
Advanced Engineering Informatics	18
Maritime Policy & Management	17
Journal of the Operational Research Society	16
Building and Environment	15
Transport	13
Engineering Optimization	11
Total, primeras 5	373
Total, primeras 10	560
Total	729

Fuente: Elaboración propia

La secuenciación de proyectos con recursos limitados (Resource Constrained Project Scheduling Problem: RCPSP), es un problema combinatorio NP-hard cuyo propósito es encontrar los tiempos de inicio de un conjunto de actividades que constituyen un proyecto, con la finalidad de minimizar su tiempo de ejecución total, y a la vez cumplir con dos conjuntos de restricciones, el primero, denominado de relaciones de precedencia y el segundo, de capacidad de recursos renovables o no renovables, estas dos últimas están definidas en [39] y comentadas en [40]. Los enfoques que se han usado para la solución del RCPSP son exactos y de aproximación (ver tabla V). Los primeros garantizan una solución óptima, siempre que ésta exista; sin embargo, en problemas grandes o muy complejos podría hacerse inviable ya que el tiempo de cómputo crece en forma exponencial con el tamaño del problema. Así mismo, los problemas de secuenciación de proyectos constituyen una familia de diversos problemas de acuerdo con los objetivos, tipos de recursos disponibles y la tipología de red. El objetivo principal consiste en minimizar la duración total del proyecto, cuando las actividades que lo componen no pueden interrumpir su ejecución y están sujetas exclusivamente a las relaciones de precedencia del tipo end-start.

Tabla V

Principales algoritmos metaheurísticos aplicados para la solución del RCPSP

Algoritmos Metaheurísticos	Principales trabajos	Descripción
Simulated Annealing	Kirkpatrick [41], Khachaturyan y otros [42]	Se inspira en el proceso de templado del metal
Tabu Search	Glover [43], [44], Artigues y otros [45], Baar y otros [46]	Es una búsqueda local que trata de no quedar atrapada en un óptimo local, mediante el uso de información que recauda a medida que el algoritmo transcurre
Genetic Algorithm	Holland [47], Lancaster & Ozbayrak [48]	Se inspira en la teoría neodarwiniana de la evolución, que, trasladada al campo de optimización
Evolutionary Programming	Fogel y otros [49], Yao y otros [50]	Cada solución no se interpreta como un individuo sino como una especie biológica diferente, y plantea la evolución de manera más global.
Greedy Randomized Adaptive Search Procedure: GRASP	Hart and Shogan [51], Feo & Resende [52], [53]	Este método consta de dos fases fundamentales, una fase constructiva y una de mejora
Scatter Search	Glover [54], Laguna & Marti [55]	Esta metaheurística se considera un proceso evolutivo donde se construye un conjunto de

Algoritmos Metaheurísticos	Principales trabajos	Descripción
		referencia de soluciones buenas, pero dispersas
Ant Colony Optimization	Colomi y otros [56], [57]	Intenta reproducir el mecanismo utilizado por las hormigas para localizar el alimento e informar a la colonia donde se encuentra.
Estimation Distribution Algorithm: EDA	Larranaga & Lozano [58], Pelikan y otros [59], Lozano [60]	Es un metaheurístico catalogado como poblacional, al igual que los algoritmos genéticos y la programación evolutiva
Hybrid Algorithms	Talbi [61], Valls y otros [62]	La idea fundamental de los algoritmos híbridos es combinar o unir varias metaheurísticas que se complementan entre sí.
Hyperheuristic Algorithms	Burke y otros [63], [64], Santana y otros [65]	Se consideran metaheurísticos de alto nivel, que coordinan y controlan otros metaheurísticos de bajo nivel o heurísticos primitivos, de manera adaptativa según el problema.
Adaptive Algorithms		Los algoritmos adaptativos utilizan información propia del problema particular, que están por resolver, para la estimación de los valores más convenientes para los parámetros.

Fuente: Elaboración propia. Adaptado de [66]

Por ejemplo: se establecen fechas obligatorias máximas o mínimas para las actividades, atrasos mínimos o máximos entre las actividades, disponibilidad variable de los recursos a lo largo del tiempo, así como también, se pueden establecer diferentes objetivos como maximizar el valor neto del proyecto, nivelar la demanda de los recursos. Según Kolish y Padman [67], los objetivos de los problemas de secuenciación de proyectos tienen la siguiente clasificación: Minimizar la Duración del Proyecto (Makespan), Minimizar los Atrasos de las Actividades, Maximizar el Valor Presente Neto (VPN) del Proyecto, Maximizar la Calidad del Proyecto, Minimizar el Costo del Proyecto y el Objetivo Basado en Recursos. Además, en los problemas de secuenciación de actividades (scheduling) se encuentran metodologías heurísticas que no tienen como propósito encontrar un óptimo global sino obtener soluciones factibles. Si bien los heurísticos basados en reglas de prioridad no son tan sofisticados como los metaheurísticos, se usan conjuntamente con ellos, especialmente para generar soluciones iniciales [68].

Algunas metodologías basadas en reglas de prioridad usan la programación obtenida del método de la ruta crítica PERT/CPM, de la cual se obtiene información de varios parámetros de cada actividad, tales como tiempo más próximo de inicio (early start), tiempo más tardío de inicio (late start), tiempo más próximo de finalización (early finish), tiempo más tardío de finalización (late

finish) y holguras, entre otros [68]. Los métodos heurísticos basados en reglas de prioridad son procedimientos iterativos compuestos de dos elementos: un esquema generador de secuencias y una regla de prioridad, tal como se describe [66].

Cabe destacar que el problema de secuenciación de proyectos con recursos limitados y un único modo de ejecución de las actividades (RCPSP) es una generalización del problema de Job Shop (1985) y ha atraído la atención de un gran número de investigadores [69], de hecho, la necesidad de disminuir los costos de un proyecto, aumenta la necesidad de administrar de forma óptima los recursos han impulsado las investigaciones con un objetivo, y es el de realizar nuevas técnicas de solución, tanto heurísticas como metaheurísticas [40].

Finalmente, se destacan algunos trabajos relacionados al problema de secuenciación o de proyectos o tareas con recursos limitados, entre los cuales tenemos: Alcaraz & Maroto [70], Alvarez-Valdez & Tamarit [71], Ballestin, Valls & Quintanilla [72], Brucker & otros [73], [74], Brucker & Knust [75], Christofides y otros [76], Hartmann [77], Hartmann & Kolisch [78], Kolisch [79], Kolisch y otros [80], [81], Valls y otros [82], Kolisch & Hartmann [83], [84].

## VII. SECUENCIACIÓN DE PROYECTOS CON RECURSOS LIMITADOS Y MODO ÚNICO RCPSP

El problema de Secuenciación de Proyectos con Recursos Limitados y un modo único de ejecución de las actividades, ha sido ampliamente estudiado en la literatura, es un problema combinatorio clásico que aparece en las líneas de manufactura y producción, en particular en líneas de ensamble o sistemas de producción Justo a Tiempo como lo exponen Kolish & Padman [67].

Un proyecto consta de  $n$  actividades reales que tienen que ser programadas contemplando sus relaciones de precedencia (las tareas que se ejecutan previamente) y las restricciones en los recursos renovables de manera tal que, el tiempo requerido para desarrollar todas las actividades sea minimizado. Un proyecto de estas características puede ser representado por un grafo (activity-on-node - AoN- network), donde los nodos  $V = \{0, 1, \dots, n + 1\}$  representan las actividades y, en particular los nodos 0 y  $n + 1$  son actividades ficticias que representan el inicio y finalización del proyecto respectivamente. Cada una de las  $j$  actividades posee una duración  $d_j$ , desde que se ejecuta hasta que finaliza, y una cantidad requerida de recurso  $r_j$ . Las actividades están sujetas a dos clases de

restricciones, a saber:

**Definición 1.** Restricciones de precedencia: consisten en que cada actividad sucesora  $j$  no puede ser iniciada antes de que todas sus actividades predecesoras  $i$  hayan terminado  $i, j \in V, i \neq j$ . Una restricción de precedencia se representa en el grafo mediante un arco  $(i, j)$  entre los nodos o actividades  $i$  y  $j$ .

$$\begin{aligned} s_i + d_i &\leq s_j & (i, j) \\ &\in N \end{aligned} \quad (1)$$

**Definición 2.** Restricciones de recursos: consisten en que, para la realización de cada actividad  $j$ , que consume  $r_{jk}$  cantidades de recursos, los cuales son limitados. Mientras una actividad se encuentra activa no se puede disponer, para otra actividad, de esa cantidad de recursos que la primera esté utilizando. Sin embargo, si se tuviera mayor disponibilidad de recursos, éstos podrían usarse para hacer otras actividades simultáneas.

En este problema, se supone que los recursos usados deben ser renovables, de esta manera, cada vez que se termina una actividad, retorna la cantidad de recursos que utilizó para tener nuevamente estos recursos disponibles [69]. Al conjunto de todos los recursos requeridos para emprender el proyecto se lo denota con  $R$ . El recurso renovable  $k \in R$  posee una disponibilidad  $R_k$  durante cada período. Una restricción de recursos implica que para cada recurso  $k \in R$  y durante cada instante de tiempo, la suma de los recursos demandados por las actividades que están siendo procesadas no debe ser mayor a la disponibilidad de recursos  $R_k$ .

$$\sum_{j \in A(S,t)} \leq R_k; \quad k \in R; \quad t = 0, \dots, T - 1 \quad (2)$$

**Definición 3.** Una secuencia  $S = (s_0, s_1, \dots, s_{n+1})$  define, para cada actividad  $j \in V$ , el tiempo que debe comenzar a ejecutarse  $s_j$ . Asumiendo, sin pérdida de generalidad, que la actividad 0 comienza en el tiempo 0, la duración de las actividades son múltiplos enteros de un período de tiempo y que una tarea siempre comienza al inicio de dichos períodos.

Una actividad  $j$  que posee una duración  $d_j$  y comienza en el período  $t$ , será procesada en el rango de períodos  $[s_{j+1}, s_j + d_j]$ . El comienzo de la tarea  $j$  estará supeditado a la disponibilidad de los recursos durante el instante de tiempo  $t$ . Para una secuencia  $S$ , pueden obtenerse el conjunto de actividades que se están

ejecutando en ese instante  $t$  como  $A(S, t) = \{j \in V | s_{j+1} \leq t \leq s_j + d_j\}$ . Una secuencia  $S$  es considerado viable respecto de su precedencia  $i$  si se cumple que  $s_i + d_i \leq s_j$  para cada  $(i, j) \in N$ . Una secuencia  $S$  es considerado viable respecto de sus recursos si, para cualquier recurso  $k \in R$ , en cualquier instante  $t = 0, \dots, T - 1$ , la capacidad requerida por las tareas que se están ejecutando  $r_{jk}(S, t) = \sum_{j \in A(S,t)} r_{jk}$  no excede a la capacidad disponible  $R_k$ . Es fundamental hallar cotas superiores e inferiores apropiadas para poder encontrar la solución mediante el menor número de iteraciones [72]. La cota inferior  $LB_0$  se estima como el tiempo total de ejecución del proyecto  $T$ , calculada mediante el método de la ruta crítica CPM (Critical Path Method), sin considerar restricciones de recursos, ya que la ruta crítica determina la mínima duración del proyecto. El objetivo es encontrar secuencias cuyas duraciones sean inferiores a esta cota superior y, en lo posible, iguales a la cota inferior, en cuyo caso se habría encontrado una solución óptima.

Un problema de optimización de un RCPSp tiene como finalidad encontrar una secuencia  $S$  que sea viable, respecto de la precedencia y el consumo de recursos, minimizando el makespan, o sea, el tiempo de inicio de la tarea ficticia final  $s_{n+1}$ . En general, la solución ideal para un RCPSp está sobre la consideración de satisfacer las restricciones sobre la capacidad de diferentes tipos de recursos en cada periodo de tiempo. Los resultados que pueden ser obtenidos ayudaran a los jefes de producción a decidir cuántos recursos pueden ser utilizados para el procesamiento de cada actividad y minimizar el tiempo de conclusión de un proyecto. A continuación, se dará una definición de RCPSp tomada de Mingozzi y otros [14].

**Definición 4.** El RCPSp puede definirse de la siguiente manera: sea un proyecto constituido por un conjunto  $X = (1, \dots, n)$  de actividades y un conjunto de  $R = (1, \dots, m)$  de recursos, donde cada recurso  $k \in R$  tiene una disponibilidad total  $b_k$  en cada intervalo de tiempo. Cada actividad  $i \in X$  tiene un tiempo de procesamiento constante  $d_i$ , cuya ejecución requiere de una cantidad constante  $r_{ik}$  del recurso  $k$ . Las interrupciones de las actividades no son permitidas y los tiempos de preparación se asumen dentro de los tiempos de procesamiento e independientes de las actividades. Las actividades ficticias 1 y  $n$  representan el inicio y la finalización del proyecto, con duración y consumo de recursos iguales a cero.

VIII. SECUENCIACIÓN DE PROYECTOS CON RECURSOS LIMITADOS EN TC

Anteriormente, se realizó una clasificación de la literatura de OOTC. De esta se han seleccionado 47 artículos relacionados esencialmente en la búsqueda realizada particularmente con programación de proyectos en las diferentes ATC y que a continuación se hará un análisis sistemático que mostrará, claramente, las similitudes y las diferencias entre las diversas contribuciones. Esto permitirá identificar vacíos, los posibles incrementos o desarrollos teóricos y aplicaciones potenciales para la teoría existente. En esta sección se presenta una taxonomía considerando los principales elementos que hace parte en la OOTC. Para este caso tendremos en cuenta alguno de los problemas comunes de decisión que surgen en el proceso de planificación en una TC, tales como: Berth Allocation, Quay Crane Scheduling Yard Operations, Transfer Operations, Stowage Planning.

Teniendo en cuenta lo anterior, se han considerado dos grandes categorías en esta taxonomía, que a su vez se subdividido en otros elementos que hace parte fundamental en la OOTC. Las categorías por revisar son: principales elementos de estudios en las investigaciones en la OOTC y modelación (Algoritmos/Heurísticos) en la OOTC, como se muestra en la tabla VI.

Se debe tener en cuenta que, al aplicar la taxonomía propuesta, algunas celdas pueden permanecer vacías. Esto significa el artículo revisado no realiza estudio sobre este elemento en particular. Las columnas se encuentran marcadas con “x” donde se relacione dicho estudio como se pueden ver en el cuadro 8, sin embargo, en él se agrega un elemento que se denominó “otros”, debido a que varias de las investigaciones poseen un desarrollo menos común (el número de veces mencionado es poca) que los demás teniendo en cuenta la selección realizada.

Las columnas donde se marcaron los principales elementos de estudios en las investigaciones relacionadas con la OOTC en la tabla VII, suman 146 veces, del lado donde se relacionan los modelos (Algoritmos/Heurísticos), suman 61 veces de los marcados, esto nos muestra que la taxonomía realizada la hace suficiente para clasificar la literatura estudiada. La subcategoría menos marcada en la tabla VII en los estudios e investigaciones relacionadas con la OOTC, es la 1.11 esto es, la relación con la programación de tareas y las actividades de los trabajadores. Los dos casos mencionados están descritos en Mattfeld y otros [85] y

Hartmann [4], para el primero caso la distribución de los lugares de almacenamiento tiene un impacto significativo en el uso de mano de obra y en el segundo los contenedores frigoríficos requieren un manejo especial por un recurso de mano de obra, los cuales deben conectar y desconectar, hacer pequeñas tareas de reparación y controlar la temperatura.

Tabla VI  
Categorías utilizadas en la taxonomía en la revisión de la literatura

1	Principales elementos de estudios en las investigaciones relacionadas con la OOTC	2	Modelación (Algoritmos/Heurísticos) en la OOTC		
1.1	Automatic Guided Vehicle	2.1	Branch and bound	2.11.5	The extended maximum-matching algorithm
1.2	Cranes	2.2	Genetic algorithm	2.11.6	Heuristic algorithm
1.3	Transportation	2.3	Squeaky wheel	2.11.7	Simulated annealing
1.4	Dock or Quay	2.4	Adaptive search algorithm	2.11.8	Insertion heuristic
1.5	Container	2.5	Priority scheduling rule	2.11.9	Multi-layer genetic algorithm (MLGA), genetic algorithm plus maximum matching (GAPM)
1.6	Parking	2.6	Construction heuristic	2.11.10	Ant colony optimization
1.7	Loading	2.7	Serial scheduling	2.11.11	Neighbourhood search algorithms
1.8	Unloading	2.8	Greedy strategy	2.11.12	Three-stage algorithm
1.9	Yard	2.9	Tabu search	2.11.13	CPLEX
1.10	Inventory	2.10	Maximum integer programming	2.11.14	Double girder bridge crane
1.11	Worker	2.11	Otros	2.11.15	Critical-Shaking Neighborhood Search
		2.11.1	Lagrangian relaxation	2.11.16	Assignment algorithm
		2.11.2	Neighborhood search heuristic	2.11.17	Exploratory Constructive Algorithm
		2.11.3	Integer programming	2.11.18	Analytic Constructive Algorithm
		2.11.4	Algorithm that computes scenarios on the basis of these parameters	2.11.19	Local search

Fuente: Elaboración propia

Las subcategorías que mayor mención tienen en la tabla 8 en los estudios e investigaciones relacionadas con la OOTC, son 1.2, 1.4, 1.5, 1.7, 1.8 las cuales hacen relación a los más estudiados hasta el momento sobre programación de grúas, atraque de buques, containers, cargue y descargue. Por otra parte 7 de los 46 artículos son revisiones de la literatura, las cuales clasifican los procesos logísticos, estudian el enrutamiento y programación de buques, optimización de redes y AVG entre otros elementos de investigación. Otras subcategorías mencionadas entre 3 y 9 veces en el mismo cuadro 8, hace referencia al transporte, parqueo y el inventario, (siendo estos dos últimos mencionados solo 5 veces), para el caso del inventario Mattfeld y otros [86] lo

evidencia en dos de sus trabajos.

La categoría que hace relación a los modelos (algoritmos/heurísticos) aplicados en cada una de las investigaciones como se puede ver en la tabla 8, destacamos que los más utilizados son Genetic Algorithm (2.2) y Priority Rule Scheduling (2.5), no podemos dejar de mencionar otros modelos que son también utilizados tales como Greedy Strategy (2.8), Tabu Search (2.9), Maximum Integer Programming (2.10). En esta taxonomía, 22 de los artículos utilizan otro tipo de modelos que no son mencionados con mucha frecuencia, esto debido a la particularidad de cada una de las investigaciones realizadas. Los datos arrojados en esta taxonomía complementan los datos obtenidos en las tablas V y 6, como los modelos más aplicados en los estudios del problema RCPSP.

En la revisión realizada se resalta que los problemas mayormente tratados están relacionados con el problema de asignación de atraque (BAP), este se refiere al problema de la asignación de buques a amarraderos dada en la definición 8. En el caso de la investigación sobre “Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)” que es el objeto esta revisión, se menciona 5 veces, autores como: Hartmann [4], Douma y otros [87], [88], Fink & Homberger [89] además de Wang y otros [90] son los que hacen énfasis en dicho problema.

Hartmann [4] propone un modelo general para varios problemas de programación que se producen en la logística de TC. Este modelo de programación consiste en la asignación de trabajos a recursos y la disposición temporal de los trabajos sujetos a restricciones de precedencia y tiempos de configuración dependientes de la secuencia (que pueden ser tareas de transporte u otras actividades) que deben programarse y asignarse a un recurso.

En Douma y otros [87] se estudia el problema de la alineación de las rotaciones de barcasas con los horarios de muelle de terminales en el puerto de Rotterdam, utilizan el problema fuera de línea de referencia de los resultados de simulación y modelan el problema fuera de línea como RCPSP, además, en Douma y otros [88], estudian la manipulación de la barcaza, es decir, cómo optimizar la alineación de las operaciones de barcasas y terminales en un puerto como Rotterdam y Amberes, mediante el concepto de sistemas de agentes múltiples y el problema RCPSP.

Por otro lado, Fink & Homberger [89] muestra en su investigación una extensión del problema multi-agente en la programación de proyectos con recursos limitados de modo único no preventivo con objetivos de flujo de efectivo descontado, sin embargo, este estudio no es aplicado a las operaciones en TC, pero el mecanismo propuesto resulta ser un método eficaz para coordinar a los agentes interesados con metas conflictivas que colaboran en proyectos con limitaciones de recursos.

Finalmente Wang y otros [90] plantea como objetivo de minimizar el tiempo máximo de finalización de una grúa puente de doble viga que es capaz de manejar contenedores de dos bahías adyacentes simultáneamente, evitando colisiones de grúas, ahorrando viajes y reposicionando costos, y finalmente mejorando la eficiencia terminal, Wang propone un algoritmo heurístico de dos etapas en el que se obtiene secuencias de operación en cada bahía mediante doble ciclo y el horario integrado para ambas bahías. Se construye resolviendo conflictos de recursos usando la estrategia de costo mínimo propuesto.

En la taxonomía realizada en la tabla VII se detallan otras investigaciones importantes tales como, lo relacionado a Quay Crane Scheduling (programación de la grúa de muelle). Autores como, Meisel & Bierwirth [91], Kaveshgar y otros [92], Nam & Lee [93], Lashkari y otros [94], realizan sus estudios en este problema, el cual es un campo de creciente interés en la investigación y la práctica. Los diversos modelos para la programación de la grúa de muelle se consideran al servicio de barcos de contenedores en diferentes niveles de detalle, tal como lo hace Lashkari y otros [94], proponiendo y generando una solución a un nuevo problema denominado Dual-Spreader Crane Scheduling Problem (DSCSP).

Meisel & Bierwirth [91], presenta un enfoque unificado para evaluar el rendimiento de diferentes clases del modelo y los procedimientos de solución. Kaveshgar y otros [92], toca el problema de programación de la grúa muelle, que se ha demostrado que es NP-completo. Por esta razón, numerosos estudios han propuesto el uso del algoritmo genético como el medio para obtener la solución en un tiempo razonable. Kaveshgar amplía la investigación en esta área mediante la utilización del algoritmo genético que está disponible en la última versión del Global Optimization Toolbox en MATLAB 7.13 para facilitar el desarrollo. Y Nam & Lee [93] trabaja en un caso práctico, una plataforma flotante móvil con un sistema de manejo de contenedores a bordo para que

pueda cargar/descargar contenedores desde/hacia un buque de contenedores anclado en alta mar. Propone una solución común, un algoritmo basado en reglas de prioridad y un algoritmo genético basado en clave aleatoria.

Para finalizar el análisis de la taxonomía, se realizó un análisis de clúster con enlace Ward realizado con el software IBM SPSS Statistics 23, utilizando las categorías en la revisión, Automatic Guided, Vehicle, Cranes, Transportation, Docks, Container, Parking, Loading, Unloading, Yard, Inventory, Worker como se muestra en el figura 5 (Dendrograma), de tal manera que los clusters encontrados son: Cluster 1, Inventory, Worker, Cluster 2, Automatic Guided, Vehicle, Transportation, Parking, Yard, Cluster 3, Loading, Unloading, Cranes, Docks, Cluster 4, Container. Estos clusters identificados por el programa estadístico dan elementos para futuros estudios, teniendo en cuenta las relaciones de cada una de las categorías planteadas.

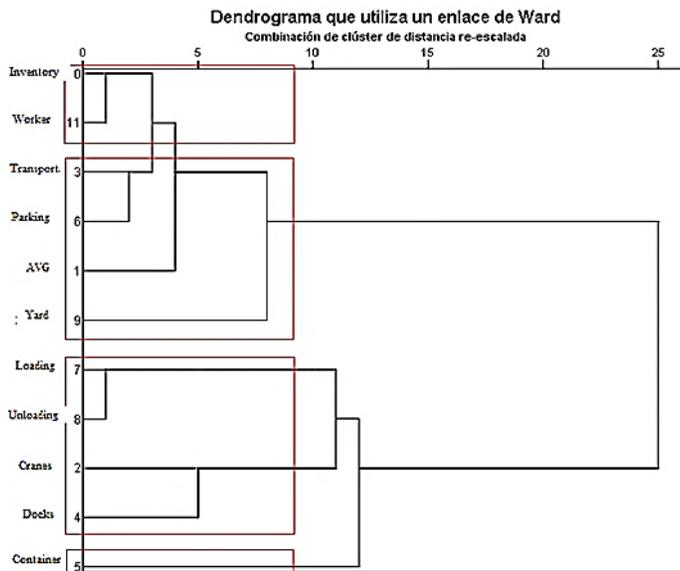


Fig. 5: Dendrograma categorías de estudio en las Actividades de Terminales de Contenedores (ATC)  
Fuente: elaboración propia

Tabla VII

Principales elementos de estudios y modelación (Algoritmos / Heurísticos) en las investigaciones relacionadas en la optimización de operaciones en terminales de contenedores (OOTC)

AUTOR(ES)	Año	Principales elementos de estudios en las investigaciones relacionadas con la OOTC											Modelación (Algoritmos/Heurísticos)										
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11
Cao, B. [98]	1992			x		x				x													
Kozan & Preston [99]	1999					x		x								x							x
Imai y otros [7]	2001					x																x	2.11.1
Mattfeld & Kopfer [88]	2003										x	x											2.11.2
Zhang y otros [9]	2003		x			x				x													2.11.3
Hartmann, Sönke [4]	2004	x	x									x		x			x						
Steenken y otros [41]	2004		x	x		x				x													
Christiansen y otros [100]	2004					x		x															
Hartmann, Sönke [101]	2004		x		x	x																	2.11.4
Ebben y otros [102]	2004			x	x		x									x	x						
Ebben y otros [103]	2005			x	x		x	x	x							x		x					
Vis and De Koster W. P. [40]	2005	x	x			x		x	x														x
Mattfeld & Orth [89]	2006			x		x						x						x		x			
Lau & Zhao [104]	2006	x																					2.11.5; 6
Briskorn y otros [2]	2006					x				x						x	x					x	2.11.7
Fu y otros [105]	2007					x		x	x	x						x						x	
Kozan & Preston [39]	2007	x				x				x						x							2.11.9
Lau & Zhao [106]	2008		x			x	x												x		x		
Meisel & Bierwirth [107]	2009		x		x	x		x	x					x			x	x					
Douma y otros [90]	2009		x			x		x	x	x												x	
Giallombardo y otros [108]	2010					x		x	x	x												x	
Zhen y otros [109]	2011					x		x	x								x	x					
Douma y otros [91]	2011		x			x	x							x									
Meisel & Bierwirth [94]	2011		x			x			x	x						x							
Kaveshgar y otros [95]	2012	x	x			x																	2.11.8
Hartmann, Sönke [5]	2013	x	x			x																	2.11.8
Fink & Homberger [92]	2013			x			x	x	x			x											2.11.11
Briskorn & Pesch [110]	2013		x			x	x		x	x						x							
Nam & Lee [96]	2013		x	x			x		x	x	x												2.11.12
Chen y otros [111]	2013		x			x	x			x	x												
Rashidi & Tsang [112]	2013												x										
Christiansen y otros [113]	2013					x										x							
Imai y otros [25]	2013					x		x	x														2.11.13
Berghman y otros [114]	2014		x			x			x	x													2.11.14
Wang y otros [93]	2014		x			x	x			x	x					x							x
Rodriguez-Molins y otros [115]	2014					x			x	x	x												
Carlo y otros [19]	2014		x			x											x						2.11.15
Zhen [116]	2015			x			x						x										
Tran and Haasis [117]	2015			x			x				x						x						2.11.13
Wang y otros [29]	2015		x				x																2.11.3
Dayama y otros [118]	2015	x					x	x									x						
Frojan y otros [124]	2015					x																	2.11.3; .17,.18,.19
Fazlollahabadi and Saidi-Mehrabadi [119]	2015					x	x																2.11.16
Hermel y otros [120]	2016		x			x	x																
Hu y otros [121]	2016						x																
Li y otros [122]	2016						x																

Fuente: Elaboración propia

## IX. CONCLUSIÓN

Las terminales portuarias, en particular las TC, son un nodo esencial en las redes de transportes mundiales, por lo cual las operaciones en estos terminales, se hace necesario ser optimizadas con el fin de lograr la máxima productividad global en este nodo de la red. En este trabajo se seleccionaron investigaciones que representan periodos diferentes, journals diferentes cuyos autores provienen de distintos países y continentes, además, de diversas rutas al análisis en la optimización de operaciones de las actividades o tareas que se realizan en una TC, la cual permitieron evidenciar múltiples enfoques de solución utilizados.

La subjetividad inherente a la selección de trabajos ilustrativos en este tema, la primera consulta realizada menos sistemática se realiza en una base datos especializada en ATC (PortStudies), la cual muestra una serie de investigaciones relacionadas con manipulación de contenedores, productividad, mejora en las operaciones de servicio, modelos de asignación de atraque, modelos simulación, modelación matemática, hasta la gestión de la TC. Esta gran variedad de temas en torno a las ATC, se debe, posiblemente al crecimiento mundial en este sector y a la gran variedad de problemas que emergen del mismo.

A continuación, se presentan los resultados de un subconjunto de 46 artículos (ver tabla VII) completos seleccionados de los 729 documentos encontrados en una primera revisión menos sistemática de los años 90's hasta el año 2016, de la cual podemos destacar:

La taxonomía evidencia los tres problemas en la OOTC más estudiados en la literatura revisada como son: Berth Allocation Problem, (BAP), Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) y Quay Crane Scheduling (QCS).

Los principales elementos de estudios en las investigaciones relacionadas con la OOTC giran alrededor de la programación de grúas, atraque de buques, containers, cargue/descargue, como lo muestra la tabla VII.

No se realizaron estudios epistemológicos en las investigaciones relacionadas con la OOTC.

La taxonomía también permitió identificar 7 artículos de los 46 seleccionados, los cuales son revisiones de la literatura en algunos temas que se relacionan con el objeto estudio en este documento. Los principales aportes en estas revisiones de la literatura se enmarcan en clasificación de los procesos logísticos, enrutamiento y programación de buques, optimización

de redes y AVG.

En la tabla VII, se evidencia que el modelo más utilizado en OOTC es, Genetic Algorithm. Esto puede tener algunas ventajas como también desventajas en futuras investigaciones, por un lado, puede limitar nuevos enfoques que favorezcan las soluciones óptimas en esta área de estudio o por el contrario, posibilite innovaciones que puedan proporcionar mejores soluciones.

En la figura 5, se identifican 4 clusters como son: Cluster 1, Inventory, Worker, Cluster 2, Automatic Guided, Vehicle, Transportation, Parking, Yard, Cluster 3, Loading, Unloading, Cranes, Docks, Cluster 4, Container. Estos permitieron determinar niveles de agrupación que resaltan elementos claves para futuros estudios, teniendo en cuenta las relaciones de cada una de las categorías planteadas.

En cuanto al tema relacionado con la secuenciación de proyectos con recursos limitados o "Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)", uno de los principales trabajos hallados, fue el desarrollado por Hartmann [4]. La particularidad de este trabajo es que su enfoque radica en la categoría "recurso humano" en las ATC. En esta revisión se evidencia poco desarrollo en esta línea de investigación. Es posible que por la especificidad de la búsqueda en este estudio no haya permitido encontrar más investigaciones en esta línea, sin embargo, es un buen indicio para seguir escudriñando posibles vacíos alrededor del RCPSP en la OOTC. Sin embargo, aunque en la actualidad la automatización de las ATC es de gran importancia para la optimización en esta área, también es cierto, que en regiones menos avanzadas tecnológicamente o sociedades emergentes, el trabajo humano todavía es requerido en estas operaciones.

En la literatura revisada, también se encuentra un valioso aporte al tema de las ATC, dicho trabajo es el realizado por Steenken y otros [95], los cuales recopilan los principales trabajos relacionados con la gestión de las TC. Estos autores agrupan los diferentes trabajos según el sub-sistema del terminal gestionado, donde se debe tener en cuenta que la operativa de cada terminal depende de su tipo, y que a su vez depende de factores como tamaño, tipo de mercancía manipulada, etc. Finalmente, la taxonomía mostrada en la tabla VII posee un nivel de detalle que permitió hacer un buen estudio en las categorías y subcategorías planteadas para esta. Sin embargo, esta taxonomía no debe considerarse fija para siempre, sino que debe

evolucionar a medida que evolucione el campo que abarca. De hecho, la taxonomía anterior, permitirá en trabajos posteriores redefinir algunas de las categorías y subcategorías expuestas en este. Por ejemplo, estudios sobre todo tipo de puertos, como puertos de granel o puertos fluviales; estudios con nuevos métodos de optimización, permitiendo así la generación de nuevo conocimiento.

## REFERENCIAS

- [1] T. A. I. Zamora y R. O. H. Pedraza, «El transporte internacional como factor de competitividad en el comercio exterior,» *Journal of Economics, Finance & Administrative Science*, vol. 18, nº 35, pp. 108-118, 2013.
- [2] D. Briskorn, A. Drexl y S. Hartmann, «Inventory-based dispatching of automated guided vehicles on container terminals,» *OR Spectrum*, vol. 28, nº 4, pp. 611-630, 2006.
- [3] R. Dekker, P. Voogd y E. v. Asperen, «Advanced methods for container stacking,» *OR Spectrum*, vol. 28, nº 4, pp. 563-586, 2006.
- [4] S. Hartmann, «A general framework for scheduling equipment and manpower at container terminals,» *OR Spectrum*, vol. 26, nº 1, pp. 51-74, 2004.
- [5] S. Hartmann, «Scheduling reefer mechanics at container terminals,» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 51, pp. 17-27, 2013.
- [6] S. Hartmann, J. Pohlmann y A. Schönknecht, «Simulation of Container Ship Arrivals and Quay Occupation,» de *Handbook of Terminal Planning*, New York, NY, Springer New York, 2011, pp. 135-154.
- [7] A. Imai, E. Nishimura y S. Papadimitriou, «The dynamic berth allocation problem for a container port,» *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 35, nº 4, pp. 401-417, 2001.
- [8] B. Pavlic, F. Cepak, B. Sucic, M. Peckaj y B. Kandus, «Sustainable port infrastructure, practical implementation of the green port concept,» *Thermal Science*, vol. 18, nº 3, pp. 935-948, 2014.
- [9] C. Zhang, J. Liu, Y. w. Wan, K. G. Murty y R. Linn, «Storage space allocation in container terminals,» *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 37, nº 10, pp. 883-903, 2003.
- [10] P. M. M. Cervantes, «Nuevos métodos meta heurísticos para la asignación eficiente, optimizada y robusta de recursos limitados,» Universitat Politècnica de València, PhD thesis, València, 2010.
- [11] A. Pritsker, L. Waiters y P. Wolfe, «Multiproject scheduling with limited resources: A zero-one programming approach,» *Management Science*, vol. 16, nº 1, pp. 93-108, 1969.
- [12] L. A. Kaplan, «Resource-constrained project scheduling with preemption of jobs,» University of Michigan, PhD thesis, Michigan, 1988.
- [13] O. R. Alvarez Valdes y G. J. M. Tamarit, «The project scheduling polyhedron: dimension, facets and lifting theorems,» *European Journal of Operational Research*, vol. 67, nº 2, pp. 204-220, 1993.
- [14] A. Mingozzi, V. Maniezzo, S. Ricciardelli y L. Bianco, «An exact algorithm for the resource-constrained project scheduling problem based on a new,» *Management Science*, vol. 44, nº 5, pp. 714-729, 1998.
- [15] E. Burak, A. Volkan Vural y R. Arnold, «The vehicle routing problem: A taxonomic review,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57, nº 4, pp. 1472-1483, 2009.
- [16] T. Notteboom, F. Parola y G. Satta, «State of the european port system market trends and structure update partim transshipment volumes. Technical report,» The Portopia Consortium, 2014.
- [17] UNCTAD, «Informe sobre el transporte marítimo 2015. Technical report,» Secretaria de las naciones unidas, 2016.
- [18] L. A. Méndez, «Simulation of the tasks in the storage yard of a port terminal,» Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Master's thesis, Universidad de La Laguna, 2015.
- [19] H. J. Carlo, I. F. A. Vis y K. J. Roodbergen, «Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme,» *European Journal of Operational Research*, vol. 236, nº 1, pp. 1-13, 2014.

- [20] S. S. Marchán, «Operaciones y colas de los barcos en los puertos.» Universitat Politècnica de Catalunya. Tesina, Catalunya, 2002.
- [21] A. Hossein Gharehgozli, F. Gerardus Vernooij y N. Zaerpour, «A simulation study of the performance of twin automated stacking cranes at a seaport container terminal,» *European Journal of Operational Research*, vol. 261, n° 1, pp. 108 - 128, 2017.
- [22] Y.-C. Yang y C.-L. Lin, «Performance analysis of cargo-handling equipment from a green container terminal perspective,» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 23, pp. 9-11, 2013.
- [23] G. Wilmsmeier, B. Tovar y R. J. Sanchez, «The evolution of container terminal productivity and efficiency under changing economic environments,» *Research in Transportation Business & Management*, vol. 8, pp. 50-66, 2013.
- [24] J. Xu, T. Notteboom y W.-K. K. Hsu, «Improving the service operations of container terminals,» *The International Journal of Logistics Management*, vol. 24, n° 1, pp. 101-116, 2013.
- [25] A. Imai, E. Nishimura y S. Papadimitriou, «Marine container terminal configurations for efficient handling of mega containerships,» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 49, n° 1, pp. 141-158, 2013.
- [26] L. Lättilä, V. Henttu y O.-P. Hilmola, «Hinterland operations of sea ports do matter: dry port usage effects on transportation costs and CO<sub>2</sub> emissions,» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 55, pp. 23-42, 2013.
- [27] B. Song y Y. Cui, «Productivity changes in chinese container terminals 2006-2011,» *Transport Policy*, vol. 35, pp. 377-384, 2014.
- [28] L. Nicoletti, A. Chiurco, C. Arango y R. Diaz, «Hybrid approach for container terminals performances evaluation and analysis,» *International Journal of Simulation and Process Modelling*, vol. 9, n° (1-2), pp. 104-112, 2014.
- [29] S.-M. Chang, J.-S. Wang, M.-M. Yu, K.-C. Shang, S.-H. Lin y B. Hsiao, «An application of centralized data envelopment analysis in resource allocation in container terminal operations,» *Maritime Policy & Management*, vol. 42, n° 8, pp. 776-788, 2015.
- [30] R. H. Chiu, C. W. Wong, T. C. Lirn y K. C. Shang, «Determinants of strategic collaborations in container terminal operations,» *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, vol. 7, n° 2, pp. 156-173, 2015.
- [31] J. A. Felício, V. Caldeirinha y A. Dionísio, «The effect of port and container terminal characteristics on terminal performance,» *Maritime Economics & Logistics*, vol. 17, n° 4, pp. 493-514, 2015.
- [32] M.-H. Phan y K. H. Kim, «Negotiating truck arrival times among trucking companies and a container terminal,» *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 75, pp. 132-144, 2015.
- [33] J. Schmidt, C. Meyer-Barlag, M. Eisel, L. Kolbe y H.-J. Appelrath, «Using batteryelectric agvs in container terminals assessing the potential and optimizing the economic viability,» *Research in Transportation Business & Management*, vol. 17, pp. 99-111, 2015.
- [34] Y. C. Yang, «Determinants of container terminal operation from a green port perspective,» *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, vol. 7, n° 3, pp. 319-346, 2015.
- [35] P. Serra, P. Fadda y G. Fancello, «Evaluation of alternative scenarios of labour flexibility for dockworkers in maritime container terminals,» *Maritime Policy & Management*, vol. 43, n° 3, pp. 371-385, 2016.
- [36] S. T. Huang, E. Bulut y O. Duru, «Multi-dimensional service improvement under the multicustomer nature of container terminals,» *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, vol. 8, n° 2, pp. 194-222, 2016.
- [37] A. H. Gharehgozli, D. Roy y R. d. Koster, «Sea container terminals: New technologies and models,» *Maritime Economics & Logistics*, vol. 18, n° 2, pp. 103-140, 2016.
- [38] C. Lu, P. Lai y Y. Chiang, «Container terminal employees' perceptions of the effects of sustainable supply chain management on sustainability performance,» *Maritime Policy & Management*, vol. 43, n° 5, pp. 597-613, 2016.

- [39] E. L. Demeulemeester y W. S. Herroelen, Project scheduling: a research handbook, Springer Science & Business Media, 2006.
- [40] A. Barrios, « Nuevos métodos heurísticos para resolver el rcpsp/max, casos modo único y modo múltiple,» Universitat de València, PhD thesis, València, 2007.
- [41] S. Kirkpatrick, «Optimization by simulated annealing: Quantitative studies,» *Journal of statistical physics*, vol. 34, n° (5-6), pp. 975-986, 1984.
- [42] A. Khachaturyan, S. Semenovsovskaya, Vainshtein y B., «The thermodynamic approach to the structure analysis of crystals,» *Acta Crystallographica Section A*, vol. 37, n° 5, pp. 742-754, Sep 1981.
- [43] F. Glover, «Tabu search, part i,» *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, n° 3, pp. 190-206, 1989.
- [44] F. Glover, «Tabu search, part ii,» *ORSA Journal on Computing*, vol. 2, n° 1, pp. 4-32, 1990.
- [45] C. Artigues, P. Michelon y S. Reusser, « Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling,» *European Journal of Operational Research*, vol. 149, n° 2, pp. 249-267, 2003.
- [46] T. Baar, P. Brucker y S. Knust, «Tabu search algorithms and lower bounds for the resource-constrained project scheduling problem.,» de *Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, Boston, MA, Springer US, 1999, pp. 1-18.
- [47] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1992.
- [48] J. Lancaster y M. Ozbayrak, « Evolutionary algorithms applied to project scheduling problems a survey of the state of the art,» *International journal of production research*, vol. 45, n° 2, pp. 425-450, 2007.
- [49] F. L. J. A. J. Owens y M. J. Walsh, *Artificial intelligence through simulated evolution*, Chichester, WS, UK: Wiley, 1966.
- [50] X. Yao, Y. Liu y G. Lin, «Evolutionary programming made faster,» *IEEE Transactions on Evolutionary computation*, vol. 3, n° 2, pp. 82-102, 1999.
- [51] J. P. Hart y A. W. Shogan, « Semi-greedy heuristics: An empirical study,» *Operations Research Letters*, vol. 6, n° 3, pp. 107-114, 1987.
- [52] T. A. Feo y M. G. Resende, «A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem,» *Operations research letters*, vol. 8, n° 2, pp. 67-71, 1989.
- [53] T. A. Feo y M. G. Resende, «Greedy randomized adaptive search procedures,» *Journal of global optimization*, vol. 6, n° 2, pp. 109-133, 1995.
- [54] F. Glover, «Heuristics for integer programming using surrogate constraints,» *Decision Sciences*, vol. 8, n° 1, pp. 156-166, 1977.
- [55] M. Laguna y R. Marti, *Methodology and Implementations in C*, vol. 24, Boston: Springer US, 2003.
- [56] A. Colomi, M. Dorigo y V. Maniezzo, «Distributed optimization by ant colonies,» de *Proceedings of the first European conference on artificial life*, Paris, France, 1991.
- [57] A. Colomi, M. Dorigo y V. Maniezzo, «An investigation of some properties of an “ant algorithm”,» de *PPSN*, 1992.
- [58] P. Larranaga y J. A. Lozano, *Estimation of distribution algorithms: A new tool for evolutionary computation*, Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001 .
- [59] M. Pelikan, K. Sastry y E. Cantú-Paz, *Scalable Optimization via Probabilistic Modeling: From Algorithms to Applications (Studies in Computational Intelligence)*, vol. 33, Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2006.
- [60] J. A. Lozano, P. Larrañaga, I. Inza y E. Bengoetxea, *Towards a New Evolutionary Computation: Advances on Estimation of Distribution Algorithms (Studies in Fuzziness and Soft Computing)*, Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2006.
- [61] E.-G. Talbi, « A taxonomy of hybrid metaheuristics,» *Journal of heuristics*, vol. 8, n° 5, pp. 541-564, 2002.
- [62] V. Valls, F. Ballestin y S. Quintanilla, «A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem,» *European Journal*

- of *Operational Research*, vol. 185, n° 2, pp. 495-508, 2008.
- [63] E. Burke, G. Kendall, J. Newall, E. Hart, P. Ross y S. Schulenburg, «Hyper-heuristics: An emerging direction in modern search technology,» de *Handbook of metaheuristics*, Springer EE.UU., 2003, pp. 457-474.
- [64] E. K. Burke y G. Kendall, *Search methodologies*, Springer, 2005.
- [65] J. Brito Santana, C. Campos Rodríguez, F. C. Garcia López, M. Garcia Torres, B. Batista Melián y J. A. Moreno Pérez, «Metaheurísticas: una revisión actualizada,» Universidad de La Laguna, San Cristóbal de La Laguna, 2004.
- [66] D. Morillo, L. Moreno y J. Díaz, «Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del problema de programación de tareas con recursos restringidos (rcpsp): una revisión. parte 2,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 10, n° 20, p. 203–227, 2014.
- [67] R. Kolisch y R. Padman, «An integrated survey of deterministic project scheduling,» *Omega*, vol. 29, n° 3, pp. 249-272, 2001.
- [68] D. Morillo, L. Moreno y J. Díaz, «Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del problema de programación de tareas con recursos restringidos (rcpsp): una revisión. parte 2,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 10, n° 20, pp. 203-227, 2014.
- [69] M. Cervantes Posada, «Nuevos Métodos Meta Heurísticos Para La Asignación Eficiente, Optimizada y Robusta de Recursos Limitados,» Universidad Politécnica de Valencia, PhD thesis, Valencia, 2009.
- [70] J. Alcaraz y C. Maroto, «A robust genetic algorithm for resource allocation in project scheduling,» *Annals of Operations Research*, vol. 102, n° 1, pp. 83-109, 2001.
- [71] R. Alvarez-Valdés Olaguíbel y J. M. Tamarit Goerlich, «Heuristic algorithms for resource-constrained project scheduling: A review and an empirical analysis,» de *Advances in Project Scheduling*, vol. 9, Amsterdam, Elsevier, 1989, pp. 113 - 134.
- [72] F. Ballestín, V. Valls y S. Quintanilla, «Due dates and rcpsp,» de *Perspectives in Modern Project Scheduling*, vol. 92, Springer US, 2006, pp. 79-104.
- [73] P. Brucker, S. Knust, A. Schoo y O. Thiele, «A branch and bound algorithm for the resource-constrained project scheduling problem,» *European Journal of Operational Research*, vol. 107, n° 2, pp. 272-288, 1998.
- [74] P. Brucker, A. Drexl, R. Möhring, K. Neumann y E. Pesch, «Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods,» *European journal of operational research*, vol. 112, n° 1, pp. 3-41, 1999.
- [75] P. Brucker y S. Knust, «A linear programming and constraint propagation-based lower bound for the rcpsp,» *European Journal of Operational Research*, vol. 127, n° 2, pp. 355-362, 2000.
- [76] N. Christofides, R. Alvarez-Valdés y J. M. Tamarit, «Project scheduling with resource constraints: A branchand bound approach,» *European Journal of Operational Research*, vol. 29, n° 3, pp. 262-273, 1987.
- [77] S. Hartmann, «A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling,» *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 45, n° 7, pp. 733-750, 1998.
- [78] S. Hartmann y R. Kolisch, «Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem,» *European Journal of Operational Research*, vol. 127, n° 2, pp. 394-407, 2000.
- [79] R. Kolisch, *Project scheduling under resource constraints: efficient heuristics for several problem classes*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [80] R. Kolisch, A. Sprecher y A. Drexl, «Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems,» *Management science*, vol. 41, n° 10, pp. 1693-1703, 1995.
- [81] R. Kolisch, C. Schwindt y A. Sprecher, «Benchmark instances for project scheduling problems,» de *Project Scheduling*, vol. 14, Springer, 1999, pp. 197-212.
- [82] V. Valls, F. Ballestín y S. Quintanilla, «A population-based approach to the resource-constrained project scheduling problem,» *Annals*

- of Operations Research*, vol. 131, n° (1-4), pp. 305-324, 2004.
- [83] R. Kolisch y S. Hartmann, «Heuristic Algorithms for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis,» de *Project Scheduling*, vol. 14, Springer US, 1999, pp. 147-178.
- [84] R. Kolisch y S. Hartmann, «Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update,» *European journal of operational research*, vol. 174, n° 1, pp. 23-37, 2006.
- [85] D. C. Mattfeld y H. Kopfer, «Terminal operations management in vehicle transshipment,» *Transportation Research Part A: Policy and*, vol. 37, n° 5, pp. 435-452, 2003.
- [86] D. C. Mattfeld y H. Orth, «The allocation of storage space for transshipment in vehicle distribution,» *OR Spectrum*, vol. 28, n° 4, pp. 681-703, 2006.
- [87] A. Douma, M. Schutten y P. Schuur, «Waiting profiles: An efficient protocol for enabling distributed planning of container barge rotations along terminals in the port of rotterdam,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 17, n° 2, pp. 133-148, 2009.
- [88] A. M. Douma, P. C. Schuur y J. M. J. Schutten, «Aligning barge and terminal operations using service-time profiles,» *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 23, n° 4, pp. 385-421, 2011.
- [89] A. Fink y J. Homberger, «An ant-based coordination mechanism for resource-constrained project scheduling with multiple agents and cash flow objectives,» *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 25, n° 1, pp. 94-121, 2013.
- [90] D. Wang, A. Goodchild, X. Li y Z. Wang, «Double girder bridge crane with double cycling: Scheduling strategy and performance evaluation,» *Journal of Applied Mathematics*, p. 12, 2014.
- [91] F. Meisel y C. Bierwirth, «A unified approach for the evaluation of quay crane scheduling models and algorithms,» *Computers & Operations Research*, vol. 38, n° 3, pp. 683-693, 2011.
- [92] N. Kaveshgar, N. Huynh y S. Khaleghi Rahimian, «An efficient genetic algorithm for solving the quay crane scheduling problem,» *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n° 18, pp. 13108-13117, 2012.
- [93] H. Nam y T. Lee, «A scheduling problem for a novel container transport system: a case of mobile harbor operation schedule,» *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 25, n° 4, pp. 576-608, 2013.
- [94] S. Lashkari, Y. Wu y M. E. Petering, «Sequencing dual-spreader crane operations: Mathematical formulation and heuristic algorithm,» *European Journal of Operational Research*, vol. 262, n° 2, pp. 521-534, 2017.
- [95] D. Steenken, S. Voß y R. Stahlbock, «Container terminal operation and operations research - a classification and literature review,» *OR Spectrum*, vol. 26, n° 1, pp. 3-49, 2004.

**Darwin Peña-González.** Doctor en Ingeniería Industrial, Universidad del Norte Colombia. Doctor en Ciencias, Mención Gerencia, Universidad URBE, Maracaibo, Venezuela. Magister en Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia. Licenciado en Matemática y Física, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. De 2000 a 2020 trabajó en diferentes Universidades de la Costa Caribe colombiana. Actualmente es profesor catedrático de la Facultad de Educación de la Universidad del Magdalena. Sus interés de investigación incluyen: Optimización de cadenas de suministros y la didáctica en la enseñanza de las matemáticas.