

01-038 – Advantages and limitations of the Branch and Bound (B&B) method applied to the resource constrained project scheduling problem (RCPSp) – Ventajas y limitaciones del método *Branch and Bound* (B&B) aplicado al problema de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSp)

Ponluisa, Neisser F.¹; Capuz-Rizo, Salvador F.¹

(1) Universitat Politècnica de València

 Spanish  Spanish

Programming projects with limited resources is a complex problem that requires precise methods to guarantee efficient solutions. This generates an optimization problem that demands effective resolution methods. The Branch and Bound (B&B) method is an exact approach that has proven effective in finding optimal solutions. B&B divides the problem into smaller subproblems and eliminates unnecessary solutions, allowing for a systematic and efficient exploration of the search space. Recent advances in the B&B method applied to the RCPSp are reviewed, including pruning techniques, branching criteria, and the use of upper and lower bounds to reduce the search space. This article provides a structured review of the main B&B variants applied to the RCPSp, classified according to their early developments, adaptations to complex constraints (such as generalized precedence relations, non-renewable resources, or spatial restrictions), and recent hybrid evolutions that integrate artificial intelligence and metaheuristics. The most relevant contributions in the literature are summarized, highlighting B&B's capacity to offer high-quality solutions for RCPSp instances. Furthermore, it confirms that B&B remains a reference method for both solving and theoretical validation, while identifying opportunities for improvement in highly complex scenarios.

Keywords: *Project scheduling; Limited resources; RCPSp; Metaheuristic techniques; Branch and bound*

La programación de proyectos con recursos limitados es un problema complejo que requiere métodos precisos para garantizar soluciones eficientes. Esto genera un problema de optimización que requiere métodos de resolución eficaces. El método *Branch and Bound* (B&B), o ramificación y poda, es un enfoque exacto que ha demostrado ser eficaz para encontrar soluciones óptimas. B&B divide el problema en subproblemas más pequeños y elimina soluciones innecesarias, lo que permite una exploración sistemática y eficiente del espacio de búsqueda. En este contexto, se revisan los avances recientes del método B&B para RCPSp, incluyendo técnicas de poda, criterios de ramificación y el uso de cotas. Este artículo presenta una revisión estructurada de las principales variantes del B&B aplicadas al RCPSp, clasificadas según sus desarrollos iniciales, adaptaciones a restricciones complejas (como precedencias generalizadas, recursos no renovables o restricciones espaciales), y sus evoluciones híbridas recientes que incorporan inteligencia artificial y metaheurísticas. Además, el artículo sintetiza las contribuciones más relevantes en la literatura, destacando la capacidad de B&B para ofrecer soluciones de alta calidad en problemas RCPSp. Asimismo, revela que este método sigue manteniéndose como herramienta de referencia y validación teórica, al tiempo que identifica oportunidades para futuras mejoras en escenarios de mayor complejidad.

Palabras claves: *Programación de proyectos; Recursos limitados; RCPSp; Técnicas metaheurísticas; Branch and bound*



©2025 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP, por sus siglas en inglés Resource-Constrained Project Scheduling Problem) representa uno de los desafíos más comunes y complejos dentro de la programación de proyectos, especialmente en entornos dinámicos e inciertos. Este problema ha sido ampliamente estudiado y aplicabilidad práctica en diversos sectores como construcción, manufactura, TI, aeronáutica o energía, donde las actividades deben ejecutarse bajo limitaciones reales de recursos y respetando dependencias complejas.

El RCPSP consiste en determinar la programación de actividades interrelacionadas desde el inicio del proyecto, respetando tanto las restricciones de precedencia como las limitaciones de capacidad de los recursos disponibles, con el objetivo de reducir el makespan (duración total del proyecto) u optimizar otros aspectos como los costes, calidad o beneficios. A diferencia de los métodos clásicos como CPM o PERT, que asumen que los recursos están disponibles y son ilimitados y un único modo de ejecución por actividad, el RCPSP integra limitaciones más realistas.

Desde el punto de vista computacional, el RCPSP ha sido clasificado como un problema NP-duro, lo que significa que no existe algoritmo alguno que resuelva todos los escenarios de forma óptima (Blazewicz et al., 1983). Esta complejidad ha impulsado a la expansión de estrategias para la resolución del problema, entre las cuales se destacan los métodos exactos, heurísticos basados en reglas de prioridad, y los metaheurísticos, como los algoritmos genéticos, colonias de hormigas entre otros. Asimismo, han surgido métodos híbridos que combinan elementos de varios enfoques. Estos métodos, aunque no garantizan soluciones óptimas, son capaces de ofrecer resultados aceptables en tiempos razonables, aunque pueden ser sensibles a la calidad o costes (Klein, 2000; Pellerin et al., 2020).

Entre los métodos exactos, el Branch and Bound (B&B) destaca por su capacidad para explorar el espacio de soluciones de forma estructurada, mediante un árbol de búsqueda en el que se aplican reglas de poda, cotas inferiores y estrategias de ramificación para eliminar regiones no prometedoras del espacio de soluciones. El RCPSP fue introducido por Christofides, Álvarez-Valdés y Tamarit (1987) y desarrollado con mayor profundidad por autores como Demeulemeester y Herroelen (1997). El método B&B ha demostrado ser capaz de resolver instancias de tamaño moderado con soluciones óptimas, siendo utilizado también como referencia para validar otros métodos.

A lo largo de los años, el B&B ha evolucionado significativamente. En sus primeras aplicaciones, se centraba en resolver el RCPSP clásico con estructuras de precedencias simples. Posteriormente, se desarrollaron diversas variantes orientadas a resolver estructuras más complejas, como el RCPSP con desfases mínimos y máximos (De Reyck & Herroelen, 1998; Heilmann, 2003), o a versiones con objetivos económicos, como el RCPSP con flujo de caja descontado (Icmeli & Erenguc, 1996). Estudios más recientes han incluido estrategias de propagación de restricciones, optimización multiobjetivo, procesamiento paralelo, métodos de aprendizaje automático con el fin de mejorar el rendimiento del método y adaptarlo a nuevas variantes del problema, tales como las versiones proactivas, robustas, híbridas entre otras (Guo et al., 2023; Li et al., 2024; Alipouri, 2021).

En la actualidad, el método B&B sigue siendo utilizado por su gran capacidad para generar soluciones óptimas, su versatilidad para comparar y validar diferentes enfoques metaheurísticos, y su capacidad de adaptación a escenarios dinámicos. Sin embargo, no se ha realizado una revisión crítica y estructurada de las variantes de este método, que permita clasificar los distintos enfoques como son los desarrollos iniciales que establecieron las bases; las adaptaciones a nuevos enfoques tanto estructurales como modernos. Por ello, el objetivo

de este trabajo es llevar a cabo una revisión crítica y estructurada de las distintas variantes existentes del B&B.

El trabajo se estructura de las siguientes secciones: la sección 2 presenta una revisión de la literatura sobre los métodos de programación con recursos limitados y método B&B; la sección 3 consta de una revisión estructurada de las variantes B&B aplicados al RCPSP, en la sección 4 se realiza una discusión crítica; la sección 5 expone las conclusiones; y, finalmente, en la sección 6 se indica la bibliografía utilizada para este trabajo.

2. Revisión de la literatura de los métodos RCPSP

El RCPSP ha evolucionado significativamente desde los modelos deterministas iniciales, como el CPM/PERT, hasta variantes que incorporan restricciones complejas, incertidumbre y múltiples objetivos. Una de las investigaciones fundamentales en este campo es la de Blazewicz et al. (1983), quienes establecieron que el RCPSP es un problema NP-duro, lo que motivó la búsqueda de estrategias más sofisticadas para encontrar mejores soluciones. Esto dio lugar al desarrollo de diversos enfoques, como los métodos exactos, heurísticos clásicos y metaheurísticos, orientados a minimizar distintos objetivos, tales como el makespan, los costes o la calidad, mediante la optimización de los recursos disponibles.

Estos métodos varían en su eficiencia dependiendo de las características del proyecto, el tipo de restricciones, la disponibilidad de recursos y el entorno computacional en el que se aplican (Herroelen, De Reyck & Demeulemeester, 1998; Pellerin et al. 2020).

A lo largo del tiempo, se han desarrollado nuevos métodos capaces de abordar instancias de gran tamaño manteniendo tiempos computacionales razonables. Entre ellos, destacan los enfoques heurísticos y metaheurísticos, que han ganado relevancia por su eficiencia práctica frente a la complejidad del RCPSP. En este contexto, Ponluisa y Capuz (2024) ofrecen una recopilación de métodos heurísticos basados en reglas de prioridad, destacando que el uso de estos métodos es de utilidad para encontrar nuevas variantes. Herroelen et al. (1998) introdujeron las relaciones de precedencia generalizadas, ampliando el espectro de aplicación del RCPSP.

Recientemente, Pellerin et al. (2020) llevaron a cabo una revisión de métodos híbridos que combinan componentes exactos y aproximados, demostrando su eficacia en entornos complejos. Estas contribuciones, junto con otras extensiones del RCPSP como el uso de modos múltiples de ejecución o la incorporación de recursos acumulativos (Kolisch & Hartmann, 2000), han impulsado el desarrollo de nuevas estrategias que buscan equilibrar calidad de solución y eficiencia. En este contexto, uno de los métodos exactos más sólidos y consistentes ha sido el método B&B, que será abordado en detalle en este trabajo.

2.1 Programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP)

El RCPSP es uno de los problemas más típicos en la programación de proyectos, tanto por su relevancia práctica en diferentes escenarios, como por su complejidad computacional. Este problema se manifiesta al determinar un calendario de ejecución para un conjunto de actividades interrelacionadas, respetando las relaciones de precedencia y las restricciones de recursos renovables, con el objetivo de minimizar el makespan, maximizar beneficios o alinearse con las estrategias de la empresa (Brucker et al., 1998; Herroelen et al., 1988).

Los métodos clásicos como CPM/PERT suponen una disponibilidad ilimitada de recursos, lo que limita su aplicabilidad en contextos reales. En cambio, el RCPSP integra restricciones realistas, reflejando la naturaleza limitada de recursos. En este sentido, Blazewicz et al. (1983) clasificaron el RCPSP como un problema NP-duro, lo que justifica el creciente interés en el desarrollo de métodos más eficientes que permitan resolverlo. En consecuencia, han surgido variantes más complejas y sofisticadas como son:

- Modos de ejecución (MRCPSP)
- De Reyck & Herroelen (1998) proponen estructuras de precedencia generalizadas.
- Shirzadeh & Shadrokh (2011) plantean el manejo de recursos acumulativos.
- Shirzadeh et al. (2014) se enfoca en la incorporación de recursos no renovables con compras estratégicas.
- Stork (2002) y Alipouri (2021) presentan los modelos que consideran incertidumbre mediante enfoques estocásticos o difusos.

El valor que aportan estas variantes ha motivado el desarrollo de distintos métodos de resolución. Entre ellos, destacan los métodos heurísticos, los cuales permiten generar soluciones aceptables en tiempos reducidos, siendo especialmente útiles en escenarios de gran complejidad donde los métodos exactos resultan inviables. Por otro lado, entre los métodos exactos destaca el B&B, que ha demostrado ser efectivo para obtener soluciones óptimas en instancias pequeñas o moderadas (Christofides et al., 1987; Demeulemeester & Herroelen, 1997). Además, los enfoques recientes como el de Pellerin et al. (2020) han promovido el uso de metaheurísticas híbridas para abordar entornos complejos, combinando precisión y eficiencia computacional. En la tabla 1. se puede apreciar un conjunto de métodos para afrontar el RCPSP, en que se describe el método y sus variantes.

Tabla 1. Métodos RCPSP.

Métodos	Descripción general	Variantes
Exactos	Exploran el espacio de soluciones de forma completa para garantizar optimalidad.	B&B Programación Lineal Entera Benders Cuts
Heurísticos	Generan soluciones aproximadas de forma rápida y eficiente, sin garantizar optimalidad.	Reglas de prioridad Métodos constructivos Búsqueda local
Metaheurísticos	Emplean procesos de búsqueda global inspirados en fenómenos naturales o sociales.	Algoritmos genéticos Recocido simulado Colonias de hormigas
Híbridos	Combinan componentes de métodos heurísticos, metaheurísticos y exactos.	Enfoques iterativos Orientados por flujo de recursos Enfoques iterativos.

Fuente: Blazewicz et al. (1983), Herroelen et al. (1998), Pellerin et al. (2020), Ponluisa & Capuz (2024), Vanhoucke & Coelho (2024).

2.2 Método Branch and Bound (B&B)

El B&B es un enfoque exacto de optimización utilizado para explorar de manera estructurada la amplia cantidad de soluciones para resolver el RCPSP. Su eficacia se basa en garantizar una solución óptima, realizando una búsqueda sistemática en una estructura que se representa como un árbol y cada nodo simboliza un estado parcial del problema. Cada nodo genera nuevas ramas por medio de la toma de decisiones secuenciales sobre la asignación de actividades, tiempo o recursos (Demeulemeester & Herroelen, 1997; Brucker et al., 1998).

Los principales componentes del método B&B son los siguientes:

- La ramificación consiste en dividir un problema complejo en subproblemas basándose en decisiones sucesivas. Este proceso crea un árbol de búsqueda, en el cual cada nodo representa una solución parcial y cada rama una posible decisión que lleva a un nuevo

subproblema. Se emplean estrategias de recorrido para cada nodo del subárbol, con el fin de organizar la exploración del espacio de soluciones (Christofides et al., 1987).

- La poda es un proceso que elimina las ramas del árbol que no puedan superar la mejor solución obtenida hasta el momento, ya que no serían útiles para encontrar una solución óptima y se logra mediante el uso de cotas. Las cotas son estimaciones del valor mínimo que puede llegar a tener cualquiera de las posibles soluciones descendientes de un nodo. Si la cota es mayor que el valor de la mejor solución encontrada hasta el momento, estas ramas se eliminan, lo que permite reducir drásticamente el número de combinaciones a evaluar sin sacrificar optimalidad, además de controlar el crecimiento del árbol de búsqueda (Demeulemeester & Herroelen, 1997; Brucker et al., 1998).

El uso de este método en el RCPSP permite incluir las relaciones de precedencia como las restricciones de recursos. Cada uno de los nodos refleja un cronograma parcial del proyecto, y las cotas permiten estimar la duración mínima restante. Aunque su mayor fortaleza es garantizar soluciones óptimas, su principal limitación es la escalabilidad porque los nodos y subárboles crecen exponencialmente cuando aumentan las actividades o los recursos (Herroelen et al., 1998). Aun con sus limitaciones el método continúa siendo una referencia fundamental para validar otras estrategias o métodos.

El método B&B ha evolucionado considerablemente desde el inicio con modelos clásicos hasta realizar adaptaciones con nuevos tipos de restricciones e incluso con métodos híbridos. Los desarrollos clasificados por aplicaciones clásicas, variantes y enfoques modernos, serán abordado con más detalle en la sección 3.

3. Evolución del método B&B en el RCPSP

En esta sección se presenta una revisión organizada de la evolución del método B&B aplicado al RCPSP. El objetivo es clasificar los estudios realizados del método aportando claridad y profundidad de uso. Se ha clasificado en tres grupos: desarrollos iniciales que establecieron las bases; adaptaciones a restricciones estructurales (recursos, precedencias generalizadas e incertidumbre); y enfoques modernos que integran el B&B con heurística e inteligencia artificial. Además, se agrega un resumen cronológico de la evolución del método B&B.

3.1 Desarrollos iniciales

El método B&B se ha consolidado como uno de los métodos exactos más relevantes para resolver el RCPSP. Su eficacia se basa en la capacidad de obtener soluciones óptimas, por medio de exploraciones ordenadas en el espacio de búsqueda, combinando las estrategias de ramificación, poda y evaluación de cotas. Desde sus primeras aplicaciones al RCPSP, el método ha demostrado su rendimiento en pequeñas y medianas instancias, dando resultados óptimos como la propuesta de Christofides et al. (1987). Además, ha servido como referencia fundamental para la validación de resultados cuando se compara con otros métodos heurísticos y metaheurísticos (Herroelen et al., 1998).

Uno de los primeros enfoques relevantes del método aplicado al RCPSP fue propuesto por Christofides, Álvarez-Valdés y Tamarit (1987), quienes introdujeron un algoritmo con mejoras en los criterios de factibilidad y poda de nodos. Esto permitió reducir significativamente el tamaño del árbol de búsqueda, estableciendo las bases metodológicas para futuras investigaciones. Posteriormente, Icmeli y Erenguc (1996) presentaron una variante orientada al flujo de caja descontada, integrando así objetivos financieros dentro de la lógica del B&B, estableciendo una nueva dimensión de optimización aparte del Makespan. En 1997, Demeulemeester y Herroelen desarrollaron un procedimiento generalizado para evaluaciones parciales más eficientes y reglas de poda avanzadas, mejorando los tiempos de ejecución e incrementando la escalabilidad del método.

Seguidamente, en 1998, Brucker et al. propusieron una nueva estrategia conocida como selección inmediata, que optimiza la elección de las actividades en cada nodo del árbol. Además, validaron el uso de la librería PSPLIB como estándar para la evaluación de algoritmos dedicados a resolver el RCPSP, que hasta la actualidad se sigue usando. También en el mismo año, Herroelen, De Reyck y Demeulemeester (1998) establecieron al método B&B como base teórica y computacional sólida para enfrentar el RCPSP, después de realizar un experimento comparativo de métodos exactos.

Siendo estos desarrollos los que constituyeron la base histórica y metodológica para el B&B enfocado al RCPSP. Su pronta implementación, permitió encontrar soluciones eficientes en diferentes entornos, además de sentar las bases del método; también ha impulsado la creación de nuevas variantes en entornos más complejos y dinámicos, con adaptaciones a restricciones estructurales y realistas.

3.2 Adaptación de nuevas restricciones

Seguido a los primeros desarrollos para resolver el RCPSP clásico, el método B&B fue ampliando su campo de aplicación a contextos más complejos y representativos en entornos reales. Estas nuevas variantes han incorporado restricciones estructurales, como precedencias generalizadas, modos múltiples de ejecución y desfases, recursos renovables y no renovables, tiempos de transferencia espaciales y temporales, como también se incorpora la incertidumbre. Estas adaptaciones responden a la necesidad de reflejar al método a situaciones de proyectos más realistas. A continuación, se presentan las nuevas variaciones:

1. Relaciones de precedencia generalizadas

Entre las primeras variaciones del método B&B relativas a las restricciones de precedencia, se destaca la de Reyck y Herroelen (1998), quienes incorporaron un modelo con relaciones de precedencias generalizadas, ampliando el uso del método. Posteriormente, Dorndorf, Pesch y Phan-Huy (2000), desarrollaron un enfoque orientado al tiempo para organizar las relaciones de precedencias, lo que permite una mayor flexibilidad en la secuencia de actividades, ampliando el modelo clásico del RCPSP.

2. Modos múltiples de ejecución y desfases

Este tipo de variación fue propuesta por Heilmann (2003) para resolver el RCPSP con múltiples modos, a su vez también incorporó restricciones de desfases mínimos o máximos entre actividades. Ampliando la representación de las actividades al considerar que pueden ejecutarse de diferentes modos, cada una con requerimientos de recursos y duración distinta. Esto permitió que esta variación pueda incrementar el realismo del modelo, al representar alternativas técnicas y temporales.

3. Gestión de recursos renovables y no renovables

Las variaciones enfocadas en recursos del B&B, Shirzadeh y Shadrokh (2011) propusieron una adaptación del método para el uso de recursos acumulativos, permitiendo modelar el consumo progresivo o parcial de recursos durante la ejecución del proyecto. Por otro lado, Shirzadeh et al. (2014) introdujeron una variante con recursos no renovables bajo planes de adquisición preestablecidos, reflejando escenarios en los que los recursos deben ser comprados o llegan de forma diferida, como ocurre en muchos proyectos de construcción o logística industrial, debido a que no son necesarios en cada una de las actividades.

4. Restricciones espaciales y de transferencia

En el continuo desarrollo de variaciones de B&B, surgen nuevos enfoques como es el caso de las restricciones espaciales, siendo abordadas por Hu et al. (2014) donde consideran que el espacio físico disponible para ciertas actividades condiciona su programación. Este enfoque

es especialmente útil en industrias como la naval o la manufactura en planta, donde los recursos de gran tamaño pueden inhabilitar diferentes zonas de trabajo por la gran cantidad de espacio físico que necesitan, afectando a la ejecución de las actividades. Después de varios años, Liu et al. (2023) integraron los tiempos de transferencia de recursos en entornos con recursos de capacidad unitaria, teniendo en cuenta los efectos logísticos del movimiento físico entre actividades de diferentes ubicaciones. Más adelante, Van der Beek et al. (2025) avanzaron en esta línea de investigación modelando estructuras de proyectos flexibles, lo que permite redefinir dinámicamente las relaciones entre actividades en función a la necesidad espacial y de ejecución del proyecto.

5. Modelados bajo incertidumbre

Otra de las variantes del B&B son los modelos con incertidumbre, introducido inicialmente por Stork (2002) con un enfoque estocástico que permite considerar duraciones aleatorias en la ejecución de actividades. Años después, Davari y Demeulemeester (2018) propusieron un enfoque de tipo chance-constrained, que establece límites probabilísticos sobre la factibilidad del cronograma. Por otro lado, en 2021, Alipouri amplió el enfoque al introducir una combinación de incertidumbre difusa y estocástica, mejorando la capacidad de representación de contextos inciertos en múltiples dimensiones. Finalmente, Li et al. (2024) propusieron un enfoque proactivo, donde el objetivo está orientado a maximizar la robustez del cronograma frente a incidentes, anticipando y mitigando riesgos temporales a los que se pueden enfrentar los proyectos en la ejecución.

3.3 Enfoques modernos que integran el B&B con heurística e inteligencia artificial.

El avance de la tecnología en los últimos años y el crecimiento de la complejidad de los entornos de planificación y programación de proyectos hace que a la par se utilice para crear nuevas variaciones del B&B. Esto ha generado estructuras híbridas del método donde se aprovecha la exactitud de las matemáticas con la flexibilidad computacional. Las variantes del método buscan superar las limitaciones de escalabilidad del B&B clásico, manteniendo resultados óptimos, a su vez se integran nuevas estrategias con el fin de mejorar la eficiencia en instancias de gran tamaño.

Una de las primeras variaciones de hibridación del B&B es el modelo Branch and Cut propuesto en 2015 por Chakraborty et al., quienes incorporan procedimientos de corte sobre el árbol de búsqueda clásico. Esta propuesta permite reducir de manera drástica el tamaño del espacio de búsqueda, siendo de utilidad para resolver problemas con múltiples restricciones estructurales. La integración del método B&B con otros métodos exactos es el primer paso para el desarrollo de nuevas variaciones híbridas.

Por otro lado, en 2023, Guo, Vanhoucke y Coelho (2023) diseñaron una nueva variación basada en un modelo predictivo de aprendizaje automático, que sirve como apoyo para la toma de decisiones dentro del proceso de ramificación. Este modelo es capaz de seleccionar de manera anticipada las configuraciones del método B&B más eficientes según las características de cada instancia del RCPSP. La combinación permite potenciar al método y adaptarlo dinámicamente, incrementando la velocidad de convergencia y la calidad de los resultados.

Finalmente, en 2024, Vanhoucke y Coelho desarrollaron un modelo híbrido que combina el rigor del B&B con la exploración intensiva de las metaheurísticas, logrando una solución intermedia entre precisión y flexibilidad. Además, limita el espacio de búsqueda mediante decisiones informadas. Por lo tanto, permite abordar eficientemente instancias altamente complejas, manteniendo una estructura exacta en el núcleo del algoritmo. En consecuencia, esta combinación es un paso importante en la búsqueda de resultados rápidos y óptimos.

3.4 Resumen cronológico de la evolución del método B&B

En esta sección se presenta en la tabla 2 un resumen cronológico de las principales variantes del B&B encontradas en la literatura, destacando el año de publicación, los autores, las variaciones principales y la aplicación de distintas variantes del RCPSP. Lo que permite tener una visión panorámica e informativa de cada una de las variaciones cronológicas.

Tabla 2. Resumen cronológico del B&B aplicadas al RCPSP (1987 al 2025).

Año	Autores	Variaciones	Aplicación RCPSP
1987	Christofides et al.	Primer algoritmo B&B aplicado al RCPSP con mejora en factibilidad y poda.	Clásico
1996	Icmeli & Erenguc	B&B con objetivo financiero (flujo de caja descontado).	RCPSP-DC
1997	Demeulemeester & Herroelen	B&B generalizado con evaluación parcial y poda eficiente	GRCPSP
1998	Brucker et al.	Introducción de selección inmediata y uso de PSPLIB.	Clásico
1998	De Reyck & Herroelen	Inclusión de precedencias generalizadas (GPR).	GPR
1998	Herroelen et al.	Análisis comparativo de métodos exactos, incluyendo B&B.	Clásico
2000	Dorndorf et al.	B&B orientado al tiempo con precedencias generalizadas.	GPR y orientación temporal
2002	Stork	Aplicación del B&B a escenarios estocásticos.	Bajo incertidumbre
2003	Heilmann	B&B para RCPSP multi-modo con desfases (mínimos y máximos).	MRCPSp/max
2011	Shirzadeh & Shadrokh	Adaptación de B&B a recursos acumulativos.	Acumulativo
2014	Shirzadeh et al.	Inclusión de recursos no renovables y compras programadas.	RCPSP-NR
2014	Hu et al.	Aplicación del B&B con restricciones espaciales.	SRCPSP
2015	Chakraborty et al.	Desarrollo de enfoque Branch and Cut	B&B híbrido
2018	Davari & Demeulemeester	B&B con formulación chance-constrained.	Bajo incertidumbre
2021	Alipouri	Modelo B&B fuzzy-estocástico con enfoque de flujo de recursos.	Fuzzy-Stochastic
2023	Guo et al.	Selección predictiva de variantes B&B mediante aprendizaje automático.	Clásico
2023	Liu et al.	RCPSP con transferencia de recursos y capacidad unitaria.	Transfer
2024	Li et al.	B&B proactivo orientado a la maximización de robustez.	Proactivo

2024	Vanhoucke & Coelho	Integración de B&B en una matheurística híbrida.	Híbrido
2025	van der Beek et al.	B&B para estructuras de proyecto flexibles.	RCPSP-PS

Fuente: Elaboración propia a partir de los artículos de la bibliografía (1987 – 2025).

4. Discusión crítica

Después de un análisis sistemático de los artículos revisados se desglosa que el método B&B (B&B) ha sido una herramienta fundamental en la resolución exacta del RCPSP, especialmente en sus primeras etapas de desarrollo. Los algoritmos propuestos en las décadas de 1980 y 1990 mostraron que es posible alcanzar soluciones óptimas para instancias de tamaño pequeño y medio, destacando por su capacidad de estructurar el espacio de búsqueda de manera lógica y controlada (Christofides et al., 1987; Demeulemeester & Herroelen, 1997; Brucker et al., 1998).

Es importante mencionar que, a pesar de la fortaleza teórica, el método B&B presenta limitaciones en términos de escalabilidad, especialmente en variantes del RCPSP cuando se incorporan múltiples modos de ejecución, así como restricciones generalizadas o estructuras de proyecto no lineales. Aunque es posible adaptar el B&B a restricciones con múltiples modos de ejecución o estructuras de proyectos no lineales, los estudios de Heilmann (2003) y Van der Beek et al. (2025) muestran que el coste computacional aumenta significativamente en estos casos. Esta escalabilidad limitada constituye uno de los principales desafíos para su aplicación en grandes proyectos.

Adicionalmente, la incorporación de incertidumbre en los parámetros del problema ha sido un desafío para el método exacto. Los trabajos de Stork (2002), Alipouri (2021) y Li et al. (2024) han demostrado que el B&B puede adaptarse a modelos estocásticos y fuzzy, pero cada vez se vuelve más complejo al realizar el modelado y la evaluación de nodos, requiriendo estrategias más sofisticadas de poda y evaluación de las soluciones parciales que se pueden obtener, con el fin de encontrar una solución óptima.

Finalmente, se debe destacar que entre las variaciones que más se ha sobresalido es la hibridación metodológica. En este sentido, los enfoques como el Branch and Cut de Chakraborty et al. (2015), la selección predictiva mediante aprendizaje automático de Guo et al. (2023), y las matheurísticas de Vanhoucke & Coelho (2024), muestran una clara evolución del B&B hacia modelos más adaptativos. Estos enfoques han permitido aplicar el método exacto en contextos donde antes solo eran viables las metaheurísticas. Esto ha abierto nuevas posibilidades de investigación para soluciones de calidad exacta en tiempos razonables.

En resumen, los trabajos analizados revelan que el método B&B continúa siendo una base teórica sólida y vigente, pero su aplicabilidad práctica requiere actualmente integración con otros enfoques o ajustes específicos al tipo de problema abordado. Aunque se han realizado mejoras, siguen existiendo una brecha importante entre la teoría y la práctica en la aplicación a proyectos reales complejos, particularmente en términos de tiempos de cómputo, interpretación de resultados y facilidad de implementación.

5. Conclusiones

El método B&B ha demostrado ser una herramienta muy valiosa por ser sólida al abordar el problema de programación de proyectos con recursos limitados cuando su formulación es clásica para entornos pequeños y medianos. Sus resultados son soluciones óptimas, lo que ha consolidado como un referente teórico y como base para validar los métodos heurísticos y

metaheurísticos. A lo largo de los años, el B&B ha evolucionado y, con ello, sus variantes se han adaptado para ser capaces de enfrentar restricciones complejas, en escenarios de incertidumbre y estructuras de proyectos complejos.

En la revisión realizada se muestra que las contribuciones más importantes se pueden agrupar en tres etapas, primero los desarrollos tempranos donde se establecieron las bases teóricas, seguido por las adaptaciones a restricciones avanzadas, que permitieron extender su aplicación a variantes del RCPSP a escenarios más reales y finalmente las variaciones modernas e híbridas, donde el B&B integra la inteligencia artificial y los métodos metaheurísticos, mejorando su eficiencia computacional, sin perder el control exacto sobre la solución óptima.

A pesar de lo antes mencionado, continúa habiendo limitaciones persistentes, como es la escalabilidad que sigue siendo un desafío central para los métodos exactos. Aunque las versiones híbridas han mejorado mucho en ese aspecto, todavía existen brechas entre la teoría y la práctica. En este contexto, se identifican oportunidades de investigaciones a futuro, entre las cuales una es desarrollar interfaces de integración entre los métodos exactos y entornos ágiles para los proyectos; otra línea es incorporar el multicriterio y objetivos económicos, que son los que se alinean con la mayor parte de empresas. Finalmente sería interesante combinar de B&B con la inteligencia artificial en escenarios dinámicos que permitan reprogramar en tiempo real.

En definitiva, el método B&B continúa vigente, adaptable y muy robusto, pero su impacto práctico depende de las investigaciones que se vayan desarrollando, sobre todo en su aplicación a proyectos reales.

6. Bibliografía

- Alipouri, Y. (2021). *A resource flow-based branch-and-bound algorithm to solve fuzzy stochastic resource-constrained project scheduling problem*. *Soft Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06147-9>
- Blazewicz, J., Lenstra, J. K., & Rinnooy Kan, A. H. G. (1983). *Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity*. *Discrete Applied Mathematics*, 5, 11–24.
- Brucker, P., Knust, S., Schoo, A., & Thiele, O. (1998). *A branch and bound algorithm for the resource-constrained project scheduling problem*. *European Journal of Operational Research*, 107, 272–288.
- Chakraborty, R. K., Sarker, R., & Essam, D. L. (2015). *Resource-constrained project scheduling: A branch and cut approach*. In *Proceedings of the 45th International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE45)*, Metz, France, 28–30 October 2015.
- Christofides, N., Álvarez-Valdés, R., & Tamarit, J. M. (1987). *Project scheduling with resource constraints: A branch and bound approach*. *European Journal of Operational Research*, 29, 262–273.
- Crespo Abril, F., & Maroto Álvarez, C. (2005). *Scheduling resource-constrained projects using branch and bound and parallel computing techniques*. *International Journal of Operational Research*, 1(1/2), 172–187.
- Davari, M., & Demeulemeester, E. (2018). *A novel branch-and-bound algorithm for the chance-constrained resource-constrained project scheduling problem*. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504245>

- De Reyck, B., & Herroelen, W. (1998). *A branch-and-bound procedure for the resource-constrained project scheduling problem with generalized precedence relations*. *European Journal of Operational Research*, 111, 152–174.
- Dell'Amico, M., Jamal, J., & Montemanni, R. (2023). *A branch-and-bound algorithm for the precedence-constrained minimum-cost arborescence problem*. *Computers & Operations Research*, 156, 106248. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106248>
- Demeulemeester, E. L., & Herroelen, W. S. (1997). *A Branch-and-Bound Procedure for the Generalized Resource-Constrained Project Scheduling Problem*. *Operations Research*, 45(2), 201–212.
- Dorndorf, U., Pesch, E., & Phan-Huy, T. (2000). *A Time-Oriented Branch-and-Bound Algorithm for Resource-Constrained Project Scheduling with Generalised Precedence Constraints*. *Management Science*, 46(10), 1365–1384. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.10.1365.12272>
- Gao, Z., Zhang, L., Yu, P., Zhang, Z., & Li, Z. (2024). *A matheuristic-oriented iterated greedy algorithm for multi-mode resource-constrained project scheduling problem under uncertainty*. *Computers & Industrial Engineering*, 193, 110333. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110333>
- Goudarzi, E., Esmaeeli, H., Parsa, K., & Asadzadeh, S. (2023). *Proposing new clustering-based algorithms for the multi-skilled resource-constrained multi-project scheduling problem with resource leveling adjustments*. *Kybernetes*, 54(2), 1049–1081. <https://doi.org/10.1108/K-06-2023-1044>
- Guo, W., Vanhoucke, M., & Coelho, J. (2023). *A prediction model for ranking branch-and-bound procedures for the resource-constrained project scheduling problem*. *European Journal of Operational Research*, 306, 579–595. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.08.042>
- Heilmann, R. (2003). *A branch-and-bound procedure for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem with minimum and maximum time lags*. *European Journal of Operational Research*, 144, 348–365.
- Herroelen, W., De Reyck, B., & Demeulemeester, E. (1998). *Resource-Constrained Project Scheduling: A Survey of Recent Developments*. *Computers & Operations Research*, 25(4), 279–302.
- Hu, S., Wang, S., Kao, Y., Ito, T., & Sun, X. (2014). *A Branch and Bound Algorithm for Project Scheduling Problem with Spatial Resource Constraints*. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Article ID 628259. <https://doi.org/10.1155/2014/628259>
- Icmeli, O., & Erenguc, S. S. (1996). *A Branch and Bound Procedure for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows*. *Management Science*, 42(10), 1395–1408.
- Klein, R. (2000). *Bidirectional planning: Improving priority rule-based heuristics for scheduling resource-constrained projects*. *European Journal of Operational Research*, 127, 619–638.
- Li, X., He, Z., & Wang, N. (2024). *A branch-and-bound algorithm for the proactive resource-constrained project scheduling problem with a robustness maximization objective*. *Computers & Operations Research*, 166, 106623. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106623>

- Liu, Y., Jin, S., Zhou, J., & Hu, Q. (2023). *A branch-and-bound algorithm for the unit-capacity resource constrained project scheduling problem with transfer times*. *Computers & Operations Research*, 151, 106097. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106097>
- Pellerin, R., Perrier, N., & Berthaut, F. (2020). *A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem*. *European Journal of Operational Research*, 280, 395–416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.063>
- Ponluisa Marcalla, N.F.; Capuz-Rizo, S.F. (2024). Review of heuristic methods based on priority rules for constraint resources project scheduling. 28th International Congress on Project Management and Engineering, AEIPRO. Jaén, 3–4 julio 2024. Comunicación 01-030.
- Shirzadeh, A., & Shadrokh, S. (2011). *Branch and Bound Algorithms for Resource-Constrained Project Scheduling Problem Subject to Cumulative Resources*. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 147–152.
- Shirzadeh, A., Shadrokh, S., & Fathi, Y. (2014). *Branch and Bound Algorithms for Resource Constrained Project Scheduling Problem Subject to Nonrenewable Resources with Prescheduled Procurement*. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, Article ID 634649. <https://doi.org/10.1155/2014/634649>
- Stork, F. (2002). *Branch-and-Bound Algorithms for Stochastic Resource-Constrained Project Scheduling*. *Technical Report No. 702/2000, Fachbereich Mathematik, Technische Universität Berlin*.
- Van der Beek, T., van Essen, J. T., Pruyn, J., & Aardal, K. (2025). *Exact solution methods for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with a flexible Project Structure*. *European Journal of Operational Research*, 322, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.10.029>
- Vanhoucke, M., & Coelho, J. (2024). A matheuristic for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 319, 711–725. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.07.016>
- Watermeyer, K., & Zimmermann, J. (2020). A branch-and-bound procedure for the resource-constrained project scheduling problem with partially renewable resources and general temporal constraints. *OR Spectrum*, 42, 427–460. <https://doi.org/10.1007/s00291-020-00583-z>
- Zheng Gao, Z., Zhang, L., Yu, P., Zhang, Z., & Li, Z. (2024). A matheuristic-oriented iterated greedy algorithm for multi-mode resource-constrained project scheduling problem under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 193, 110333. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110333>

Utilización de inteligencia artificial generativa

En este trabajo se ha utilizado inteligencia artificial generativa (ChatGPT, OpenAI) para correcciones gramaticales.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

