# Optimización Integrada de Operaciones Portuarias: Marco Estratégico para la Asignación de Muelles, Grúas y Cuadrillas mediante Google OR-Tools

La industria del transporte marítimo internacional constituye el pilar fundamental del comercio global, facilitando el movimiento de aproximadamente el 80% del volumen total de mercancías a nivel mundial.1 En este contexto, las terminales de contenedores operan como nodos críticos donde la eficiencia en la interfaz buque-muelle determina la resiliencia y la fluidez de las cadenas de suministro globales.3 La complejidad inherente a la gestión de estas instalaciones ha derivado en la necesidad de resolver problemas de optimización combinatoria de alta dimensionalidad, tradicionalmente divididos en el Problema de Asignación de Muelles (Berth Allocation Problem o BAP) y el Problema de Programación de Grúas (Quay Crane Scheduling Problem o QCSP).5 No obstante, la tendencia contemporánea en la investigación operativa y la gestión portuaria apunta hacia un enfoque integrado, denominado Problema de Asignación de Muelles y Grúas (BACAP), que permite capturar las interdependencias entre la ubicación física de los buques y la disponibilidad de recursos de manipulación.1 El presente informe detalla un marco experto para el desarrollo de un proyecto de aprendizaje avanzado utilizando Google OR-Tools, específicamente el motor CP-SAT, para resolver un escenario portuario que integra restricciones de calado, jornadas de seis horas, y la sincronización estricta entre cuadrillas (gangs) y grúas.

## Fundamentos Teóricos y Evolución del Problema de Asignación de Muelles

El objetivo primario de la asignación de muelles es determinar el momento exacto y la posición lineal en la que cada buque que llega a la terminal debe atracar para realizar sus operaciones de carga y descarga.1 Esta decisión no es trivial, ya que debe considerar la naturaleza dinámica de las llegadas, donde los tiempos estimados de arribo (ETA) y de inicio de operaciones (ETW) están sujetos a una variabilidad significativa.5 Históricamente, el BAP se ha abordado bajo dos paradigmas espaciales principales: el modelo discreto y el modelo continuo.9

### Paradigmas Espaciales: Muelle Discreto frente a Continuo

En un modelo de muelle discreto, la línea de atraque se divide en un conjunto finito de secciones o "berths" fijos, donde cada sección puede acomodar como máximo a un buque a la vez, independientemente de su tamaño.9 Este enfoque, aunque computacionalmente más sencillo, suele resultar en una infrautilización del espacio lineal del muelle, especialmente cuando buques pequeños ocupan secciones diseñadas para buques de mayor envergadura.6

Por el contrario, el modelo de muelle continuo trata la línea de atraque como un segmento lineal ininterrumpido donde los buques pueden posicionarse en cualquier coordenada, siempre que no se solapen entre sí y respeten las distancias de seguridad.7 Este modelo es análogo a un problema de empaquetado bidimensional (2D packing), donde una dimensión representa el espacio físico (metros del muelle) y la otra el tiempo (duración de la estancia).9 La implementación de un modelo continuo es esencial para maximizar el rendimiento de la terminal, pero introduce una complejidad matemática superior al requerir el manejo de variables continuas o discretizadas de alta resolución para la posición de atraque.9

| **Característica** | **Modelo de Muelle Discreto** | **Modelo de Muelle Continuo** |
| --- | --- | --- |
| **Representación Espacial** | Conjunto de puntos o segmentos fijos | Coordenada lineal continua (0 a L) |
| **Utilización del Espacio** | Menor (limitada por el tamaño del berth) | Mayor (ajuste exacto a la eslora) |
| **Complejidad Algorítmica** | Baja (Problema de asignación simple) | Alta (Empaquetado 2D / No-Overlap) |
| **Flexibilidad Operativa** | Rigidez en la planificación | Adaptabilidad a flotas heterogéneas |
| **Software Recomendado** | MILP estándar | CP-SAT (Global Constraints) |

### Dinámica de Calado y Restricciones Batimétricas

Un factor determinante que a menudo se ignora en los modelos simplificados, pero que es crítico en la operativa real, es la profundidad del agua o calado (draft).9 La batimetría de un muelle no es uniforme; existen zonas con mayor profundidad que otras debido a patrones de dragado o topografía natural del lecho marino.15 Un buque con un calado de 15 metros no puede ser asignado a una posición de muelle donde la profundidad sea de 12 metros.9 Además, en puertos sujetos a regímenes de mareas, la ventana temporal de atraque y desatraque puede estar condicionada por el nivel del agua, lo que añade una dimensión de variabilidad temporal a las restricciones físicas.15 La integración de estas limitaciones exige que el modelo de optimización verifique que la profundidad disponible en cada metro lineal ocupado por el buque sea suficiente durante toda su estancia.11

## Sincronización de Recursos: Grúas, Cuadrillas y Jornadas de Trabajo

La capacidad de manipulación de una terminal no depende únicamente del espacio de muelle, sino fundamentalmente de la asignación de grúas de muelle (Quay Cranes o QCs) y de las cuadrillas de trabajo (gangs) necesarias para operarlas.3 En el escenario planteado, existe una relación biunívoca estricta: una cuadrilla está siempre asociada a una grúa en una jornada determinada.21

### Estructura de Jornadas y Planificación de Turnos

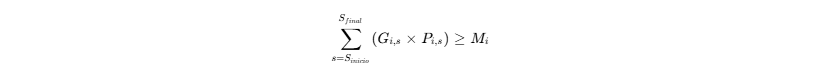
La gestión de la mano de obra en las terminales portuarias se organiza típicamente en turnos o jornadas.22 En este proyecto, se definen jornadas de 6 horas, lo que implica que la capacidad de trabajo de la terminal se renueva o se recalcula cuatro veces al día.23 Esta discretización del tiempo es fundamental para la programación con OR-Tools, ya que permite modelar la disponibilidad de recursos como un conjunto de capacidades por intervalo.22

La asignación de cuadrillas a un buque es una variable dinámica; un buque puede recibir un número diferente de grúas en cada jornada dependiendo de la prioridad, la carga de trabajo restante y la disponibilidad global.5 Esta flexibilidad, conocida como asignación de grúas variable en el tiempo (time-variant assignment), permite optimizar el uso de los recursos de forma mucho más agresiva que los modelos de asignación fija (time-invariant).5 Por ejemplo, cuando un buque está cerca de completar su operativa, se pueden liberar grúas para que comiencen a trabajar en un buque recién llegado, minimizando el tiempo ocioso del equipo.7

### Productividad y Capacidad de Trabajo

La duración de la estancia de un buque en el muelle no es un dato estático, sino un resultado del esfuerzo de trabajo aplicado.5 La relación fundamental viene dada por el número de movimientos de contenedores y la productividad media por cuadrilla/jornada.1

Sea  el número total de movimientos requeridos por el buque , y  la productividad estimada (en movimientos por jornada) para dicho buque durante la jornada . Si  es el número de cuadrillas asignadas al buque  en la jornada , la operativa finaliza en la jornada  tal que:



Esta ecuación demuestra que el tiempo de servicio es una variable endógena del modelo.26 Cuantas más grúas se asignen, menor será la duración, pero mayor será la presión sobre la capacidad total de la terminal.3

| **Parámetro** | **Definición** | **Relevancia en el Modelo** |
| --- | --- | --- |
| **Movimientos** | Total de contenedores a cargar/descargar | Determina la carga de trabajo total |
| **Productividad** | Movimientos por Gang/Shift | Define la tasa de avance de la operativa |
| **LOA (Eslora)** | Longitud total del buque en metros | Limita el número máximo de grúas simultáneas |
| **Draft (Calado)** | Profundidad necesaria para flotación | Restringe las posiciones de atraque posibles |
| **Jornada (6h)** | Unidad básica de tiempo para cuadrillas | Intervalo de decisión para la asignación |

### Restricciones de Intensidad y Eslora (LOA)

Existe un límite físico a la cantidad de grúas que pueden trabajar simultáneamente en un buque, impuesto por la eslora del mismo (LOA) y la distancia de seguridad entre los brazos de las grúas.1 No es físicamente posible colocar 10 grúas en un buque de 100 metros. Esta restricción de "intensidad máxima" debe ser respetada en cada jornada:



Además, la suma de todas las cuadrillas asignadas a todos los buques atracados en una jornada  no puede exceder el número total de grúas operativas o cuadrillas disponibles en la terminal para ese turno.3

## Modelado Matemático con Google OR-Tools CP-SAT

Para un proyecto de aprendizaje, el uso del motor CP-SAT de OR-Tools es altamente recomendable debido a su capacidad para manejar restricciones lógicas complejas y su eficiencia en problemas de programación de tareas.28 A diferencia de los modelos de programación lineal tradicionales, CP-SAT permite una formulación más intuitiva de las restricciones de no solapamiento y las relaciones condicionales.31

### Variables de Decisión y Espacio de Búsqueda

En el motor CP-SAT, todas las variables deben ser de tipo entero.27 Esto requiere un proceso de escalado previo si los datos originales contienen decimales (por ejemplo, multiplicar calados de 14.5m por 10 para trabajar con enteros de 145).16 Las variables principales para cada escala de buque  incluirían:

1. **Posición de atraque ():** Coordenada entera que representa el inicio del buque en el muelle.
2. **Tiempo de inicio ():** Jornada o minuto de inicio de la estancia.
3. **Duración ():** Tiempo total que el buque permanece en muelle.
4. **Asignación de cuadrillas ():** Variable entera para cada jornada  que indica cuántas cuadrillas trabajan en el buque .

### Implementación del No-Overlap Bidimensional

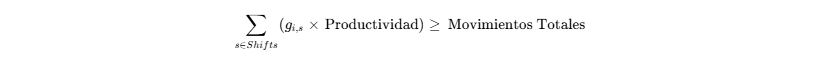
La restricción de que los buques no pueden solaparse en tiempo y espacio es el núcleo del problema.1 En CP-SAT, esto se resuelve de manera elegante utilizando la restricción global AddNoOverlap2D.16 Para ello, se crean dos variables de intervalo por buque:

* Un intervalo temporal: NewIntervalVar(start\_t, duration\_t, end\_t).
* Un intervalo espacial: NewIntervalVar(start\_x, eslora, end\_x).

El solver garantiza que, para cualquier par de buques, sus rectángulos espaciotemporales no se intercepten.16

### Modelado de la Operativa y Capacidad de Grúas

La relación entre el trabajo realizado y la duración de la estancia es no lineal, pero se puede modelar sumando la producción de cada jornada.22 Para cada buque, se debe cumplir la restricción de completitud del trabajo:



Además, se debe asegurar que  solo sea mayor que cero si el buque está realmente atracado durante la jornada .22 Esto se logra mediante el uso de variables booleanas y la función OnlyEnforceIf de OR-Tools.16

Python

# Lógica conceptual en Python para OR-Tools  
for s in todas\_las\_jornadas:  
 # La suma de cuadrillas en la jornada s no supera el total de la terminal  
 model.Add(sum(g[i, s] for i in todos\_los\_buques) <= total\_gruas\_terminal)  
   
 for i in todos\_los\_buques:  
 # El buque i solo recibe cuadrillas si está en el muelle en la jornada s  
 model.Add(g[i, s] == 0).OnlyEnforceIf(buque\_fuera\_de\_muelle\_en\_jornada\_s)

### Integración de Restricciones de Calado

La profundidad del muelle es una restricción geográfica que depende de la posición .9 Si el muelle tiene diferentes profundidades por tramos, el calado del buque  limita el dominio de la variable .15 Si discretizamos el muelle en segmentos de 1 metro, y definimos profundidad[m] como la profundidad en el metro , podemos añadir una restricción que prohíba al buque ocupar cualquier metro con profundidad insuficiente:



En OR-Tools, esto puede implementarse de forma eficiente precalculando las posiciones de atraque válidas para cada buque y restringiendo el dominio de  a esas posiciones permitidas mediante model.AddAllowedAssignments.32

## Diseño de la Función Objetivo: Calidad de Servicio y Eficiencia

Un modelo de optimización requiere una métrica clara de éxito.23 En las operaciones portuarias, el objetivo suele ser una combinación ponderada de varios indicadores clave de rendimiento (KPIs).1

### Minimización de los Tiempos de Estancia y Espera

El coste más significativo para una línea naviera es el tiempo que el buque pasa en el puerto sin realizar operaciones productivas (espera en fondeo) o el retraso en la salida respecto al horario previsto.1 El objetivo principal suele ser minimizar la suma de los tiempos de servicio de todos los buques 1:



Donde  es el momento en que se completan todas las operaciones y el buque puede desatracar.

### Optimización del Uso de Recursos Humanos y Energéticos

Desde la perspectiva de la terminal, es deseable evitar picos innecesarios en la demanda de cuadrillas que obliguen a contrataciones de refuerzo costosas o que dejen equipos ociosos.4 También se busca minimizar el "housekeeping" o movimientos internos de contenedores, lo cual se logra atracando los buques lo más cerca posible de sus áreas de almacenamiento asignadas en el patio.8 La reducción de la navegación ociosa de las grúas a lo largo del muelle también contribuye a la eficiencia energética y a la reducción de emisiones de carbono.11

| **KPI** | **Objetivo de Optimización** | **Impacto en el Puerto** |
| --- | --- | --- |
| **Tiempo de Giro** | Minimizar (Duración total en puerto) | Atractivo para navieras |
| **Retraso de Salida** | Minimizar (Tiempo post-ETC) | Fiabilidad de la cadena |
| **Uso de Grúas** | Maximizar (Productividad por hora-grúa) | Retorno de inversión en equipo |
| **Balance de Cuadrillas** | Suavizar (Evitar picos de demanda) | Estabilidad laboral y costes |

## Hoja de Ruta para el Desarrollo del Proyecto de Aprendizaje

Para llevar a cabo un proyecto de esta magnitud de manera exitosa, es fundamental seguir un proceso estructurado que combine la ingeniería de datos con el modelado matemático.

### Fase 1: Ingeniería de Datos y Preparación del Entorno

El primer paso es la recopilación y estructuración de la información.39 Se recomienda utilizar un formato de intercambio de datos como JSON o CSV para definir las instancias del problema.39

* **Buques:** Lista de escalas con eslora, calado, movimientos totales y ventanas temporales (ETA/ETW).
* **Recursos:** Número total de grúas y cuadrillas por jornada.
* **Infraestructura:** Mapa de profundidades del muelle por metro lineal.

Es crucial realizar el escalado a enteros en esta fase para que CP-SAT pueda procesar los datos.16 Por ejemplo, si el tiempo se mide en minutos y el muelle en metros, un horizonte de una semana tendría 10,080 unidades de tiempo.17

### Fase 2: Construcción del Modelo Base en Python

Se debe comenzar con un modelo simplificado que solo resuelva el BAP continuo (muelle y tiempo) sin grúas ni calado.9 Una vez que el solver sea capaz de empaquetar los buques en el espacio-tiempo sin solapamientos, se pueden añadir las capas de complejidad de forma incremental:

1. **Capa de Calado:** Restringir las posiciones de atraque según la profundidad.
2. **Capa de Operativa:** Introducir la variable de cuadrillas por jornada y la meta de movimientos totales.
3. **Capa de Recursos:** Añadir la restricción de capacidad máxima de cuadrillas por jornada y por eslora.

### Fase 3: Refinamiento Algorítmico y Heurísticas

Para problemas de gran escala (más de 30 buques por semana), el solver puede tardar en encontrar la solución óptima.29 En esta fase, se deben implementar técnicas avanzadas de OR-Tools:

* **Ruptura de Simetría:** Si hay cuadrillas o grúas idénticas, añadir restricciones que impongan un orden para reducir el espacio de búsqueda.41
* **Pistas de Solución (Hints):** Proporcionar al solver una solución inicial factible obtenida mediante un algoritmo voraz (First-Come, First-Served) para acelerar la convergencia.28
* **Límites de Tiempo:** Configurar max\_time\_in\_seconds para asegurar que el sistema devuelva la mejor solución encontrada en un tiempo razonable para la toma de decisiones.30

### Fase 4: Visualización y Análisis de Resultados

Un plan de atraque es difícil de validar sin una representación visual. El resultado estándar en la industria es el gráfico de Gantt de espacio-tiempo.1

* El eje Y representa los metros del muelle.
* El eje X representa el horizonte temporal.
* Cada buque es un rectángulo cuya altura es su eslora y su anchura es su duración de estancia.
* Los colores pueden indicar el número de grúas asignadas o el nivel de utilización de la terminal.1

## Consideraciones Avanzadas y Factores de Resiliencia Operativa

En un entorno real, la planificación está sujeta a constantes interrupciones, como averías de grúas, retrasos por mal tiempo o cambios de última hora en los planes de estiba de las navieras.2

### Integración de Mantenimiento y Fallos de Equipo

Un modelo robusto debe considerar que no todas las grúas están disponibles el 100% del tiempo.3 Las actividades de mantenimiento programado deben incluirse como "bloqueos" en el tiempo y el espacio donde la grúa no puede trabajar.3 CP-SAT permite modelar esto fácilmente creando intervalos de "mantenimiento" que consumen capacidad del recurso o que ocupan espacio físico en el muelle, impidiendo que otras grúas pasen por esa zona si están en el mismo carril.3

### El Impacto del Tráfico de Contenedores Vacíos y la Logística de Patio

Aproximadamente el 40% del tráfico en algunas terminales corresponde a contenedores vacíos, lo que genera una carga operativa significativa que a menudo no se contabiliza correctamente en la productividad de las cuadrillas.4 La coordinación entre las grúas de muelle y las grúas de patio (Yard Cranes) es vital; si el patio está congestionado, la productividad de la cuadrilla en el muelle caerá drásticamente.2 Aunque este proyecto se centra en el quayside, entender que la productividad  puede ser estocástica o depender del estado del patio permite diseñar planes más conservadores y resilientes.4

### Mejora Continua mediante Machine Learning

La predicción precisa de los tiempos de giro y de la productividad de las cuadrillas puede mejorarse mediante algoritmos de aprendizaje automático que analicen datos históricos de operaciones anteriores.11 Al integrar estas predicciones como parámetros de entrada en el modelo de OR-Tools, la terminal puede generar programas que se ajusten mucho mejor a la realidad operativa, reduciendo la brecha entre el plan y la ejecución.11

## Conclusiones y Recomendaciones Estratégicas

El desarrollo de un sistema de planificación automatizada para una terminal portuaria utilizando Google OR-Tools no es solo un ejercicio técnico de programación, sino una intervención estratégica en la eficiencia de la infraestructura crítica.4 La capacidad de sincronizar cuadrillas de 6 horas con las limitaciones físicas de calado y eslora permite transformar una operativa reactiva en una proactiva.

Para el éxito del proyecto, se recomienda encarecidamente centrarse en la fidelidad de la restricción NoOverlap2D y en la correcta discretización de las jornadas de trabajo.16 La flexibilidad que ofrece el motor CP-SAT para añadir restricciones lógicas "ad-hoc" permitirá capturar las peculiaridades específicas de la terminal que a menudo se pierden en los modelos académicos genéricos. Al finalizar el proyecto, el usuario dispondrá de una herramienta capaz de procesar múltiples escenarios de llegada de buques, optimizar el uso de los recursos humanos y garantizar la seguridad náutica mediante el respeto estricto de las profundidades de diseño. Este enfoque no solo optimiza la rentabilidad de la terminal, sino que también refuerza su posición competitiva en una red logística global cada vez más exigente y dinámica.

#### Obras citadas

1. Integrated Berth Allocation and Crane Assignment ... - UPCommons, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://upcommons.upc.edu/bitstreams/8d399456-d33f-47c3-a0d8-780d30bf8f68/download>
2. Collaborative optimization of truck scheduling in container terminals using graph theory and DDQN - PMC - NIH, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11865511/>
3. Berth Allocation and Quay Crane Assignment Considering the Uncertain Maintenance Requirements - MDPI, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/2/660>
4. Beyond River Port Logistics: Maximizing Land-Constrained Container Terminal Capacity with Agile and Lean Operation - MDPI, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/13/5773>
5. A Variable Neighborhood Search Algorithm for the Integrated Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem - MDPI, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/9/4022>
6. Berth Allocation and Quay Crane Scheduling in Port Operations: A Systematic Review, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/7/1339>
7. New exact methods for the time-invariant berth allocation and quay crane assignment problem - Optimization Online, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://optimization-online.org/wp-content/uploads/2017/03/BACAP_MILP_preprint.pdf>
8. Modeling and Solving the Tactical Berth Allocation Problem - ResearchGate, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.researchgate.net/publication/222832361_Modeling_and_Solving_the_Tactical_Berth_Allocation_Problem>
9. An Optimization Approach to Berth Allocation Problems - MDPI, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/5/753>
10. Berth allocation problem - Wikipedia, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://en.wikipedia.org/wiki/Berth_allocation_problem>
11. Machine Learning and Simulation for Efficiency and Sustainability in Container Terminals, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/7/2927>
12. Scheduling truck arrivals for efficient container flow management in port logistics - PMC, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12198297/>
13. The multi-port berth allocation problem with speed optimization: Exact methods and a cooperative game analysis - DTU Research Database, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://orbit.dtu.dk/files/261354944/MPBAP_clean.pdf>
14. An Optimization Approach to Berth Allocation Problems - ResearchGate, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.researchgate.net/publication/378723444_An_Optimization_Approach_to_Berth_Allocation_Problems>
15. The continuous dynamic berth allocation problem at a marine container terminal with tidal constraints in the access channel, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://ijce.iust.ac.ir/article-1-848-en.pdf>
16. 2d bin packing with Google OR-Tools CP-SAT, how to fix? - Yet Another Math Programming Consultant, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <http://yetanothermathprogrammingconsultant.blogspot.com/2021/02/2d-bin-packing-with-google-or-tools-cp.html>
17. Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison - SciSpace, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://scispace.com/pdf/models-for-the-discrete-berth-allocation-problem-a-1ttqp4fvou.pdf>
18. Ship scheduling with time-varying draft restrictions: a case study in optimisation with time-varying costs, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://openresearch-repository.anu.edu.au/items/531b5a00-06e7-48b0-b142-1306b6c5d09c>
19. (PDF) Modeling and Solving the Tactical Berth Allocation Problem, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.researchgate.net/publication/312944238_Modeling_and_Solving_the_Tactical_Berth_Allocation_Problem>
20. Joint Optimization of Berths and Quay Cranes Considering Carbon Emissions: A Case Study of a Container Terminal in China - MDPI, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/1/148>
21. Optimizing Work Schedule Assignments for Straddle Carrier Drivers at Container Terminals: A Collaborative Filtering Recommender System Approach - The Open Transportation Journal, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.opentransportationjournal.com/VOLUME/19/ELOCATOR/e26671212401455/FULLTEXT/>
22. CP-SAT Rostering: Complete Guide to Constraint Programming for Workforce Scheduling - Interactive | Michael Brenndoerfer, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://mbrenndoerfer.com/writing/cp-sat-rostering-constraint-programming-workforce-scheduling>
23. Shift Optimization with Google OR Tools | by Işıl Berfin Koparan - Medium, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://medium.com/@isilberfin/shift-optimization-with-google-or-tools-f23da014e480>
24. A practical introduction to Constraint Programming using CP-SAT and Python - pganalyze, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://pganalyze.com/blog/a-practical-introduction-to-constraint-programming-using-cp-sat>
25. Minimizing the total amount of drivers with OR-Tools CP-SAT - Stack Overflow, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://stackoverflow.com/questions/77866098/minimizing-the-total-amount-of-drivers-with-or-tools-cp-sat>
26. Assignment with Task Sizes | OR-Tools - Google for Developers, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://developers.google.com/optimization/assignment/assignment_cp>
27. Workers and Tasks 2025-06-27 - Activimetrics LLC, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://activimetrics.com/blog/ortools/cp_sat/workers_and_tasks/>
28. CPMpy ortools interface (cpmpy.solvers.ortools) — CPMpy 0.9.24 documentation, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://cpmpy.readthedocs.io/en/py3.8_setuptools/api/solvers/ortools.html>
29. The CP-SAT Primer - Using and Understanding Google OR-Tools' CP-SAT Solver, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://d-krupke.github.io/cpsat-primer/>
30. Understanding CP-SAT: Constraint Programming Meets SAT Solving - Medium, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://medium.com/@jonaspoelmans120/understanding-cp-sat-constraint-programming-meets-sat-solving-b137dddb943c>
31. PyJobShop: Solving scheduling problems with constraint programming in Python - arXiv, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://arxiv.org/pdf/2502.13483>
32. Basic Modeling - The CP-SAT Primer - Using and Understanding Google OR-Tools' CP-SAT Solver, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://d-krupke.github.io/cpsat-primer/04_modelling.html>
33. Parameters - The CP-SAT Primer - Using and Understanding Google OR-Tools' CP-SAT Solver, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://d-krupke.github.io/cpsat-primer/05_parameters.html>
34. CP-SAT Solver | OR-Tools - Google for Developers, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://developers.google.com/optimization/cp/cp_solver>
35. The berth allocation and quay crane assignment problem with crane travel and setup times - idUS, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://idus.us.es/bitstreams/9f122073-9243-4ecf-acb0-6025993fee54/download>
36. CP-SAT: Parameter documentation NoOverlap2D, Cumulative · google or-tools · Discussion #3107 - GitHub, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://github.com/google/or-tools/discussions/3107>
37. Python Reference: CP-SAT | OR-Tools - Google for Developers, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://developers.google.com/optimization/reference/python/sat/python/cp_model>
38. Get Started with OR-Tools for Python - Google for Developers, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://developers.google.com/optimization/introduction/python>
39. Berth Allocation Problem (BAP) dataset | Mathprog-ORlib, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://andreas-ernst.github.io/Mathprog-ORlib/info/readmeBAP.html>
40. Maritime Port Performance Dataset - Kaggle, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://www.kaggle.com/datasets/jeleeladekunlefijabi/maritime-port-performance-dataset>
41. Implementing effective operations research solutions in OR-Tools - Superlinear, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://superlinear.eu/insights/articles/implementing-effective-operations-research-solutions-in-or-tools>
42. Container scheduling optimization strategy based on clustering algorithm in port logistics system - Combinatorial Press, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://combinatorialpress.com/article/jcmcc/Volume%20127/Volume%20127a/container-scheduling-optimization-strategy-based-on-clustering-algorithm-in-port-logistics-system.pdf>
43. Predictive Analysis for Optimizing Port Operations - arXiv, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://arxiv.org/html/2401.14498v1>
44. Prediction of Vessel Arrival Time to Optimize Berth Allocation in Ports Using Machine Learning Methods - RIT Digital Institutional Repository, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://repository.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=13151&context=theses>
45. OR-Tools - Google for Developers, fecha de acceso: febrero 5, 2026, <https://developers.google.com/optimization>