



PROGRAMACIÓN DE GRÚAS PARA MANTENCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE BUQUES EN UN ASTILLERO NAVAL. USO DE MODELO MATEMÁTICO

Marcelo Guíñez Reyes*

En el presente estudio se desarrolla una propuesta de solución para el problema de asignación de grúas a proyectos o buques para la: reparación, mantención, modernización, apoyo y construcción, en el Astillero y Maestranza de la Armada de Talcahuano. Se establecen los antecedentes generales del tema y las justificaciones de éste, determinando la necesidad de proponer un modelo matemático, diseñado para el problema particular, detallando y explicando todas las variables, parámetros y restricciones que presenta la solución, teniendo una alternativa al actual sistema que depende de la experiencia del programador. Además, se proporciona un algoritmo de solución, el cual es implementado en programa ILOG CPLEX utilizando Microsoft Office Excel como plataforma, obteniendo resultados para un caso particular de instancias.

- Introducción.

Astilleros y Maestranzas de la Armada, ASMAR, es una empresa autónoma del Estado, del área de la industria Militar, cuya razón de existir es el mantenimiento de los buques de la Armada de Chile. Ubicado en el primer puerto militar, comercial y pesquero de Chile, Talcahuano, el astillero entrega los servicios de construcción de buques de guerra, auxiliares, comerciales y pesqueros para Chile y otros países, además de la reparación, modernización y refit de unidades de guerra y comerciales.

La empresa está organizada en tres plantas industriales ubicadas en las ciudades de Punta Arenas, Valparaíso y Talcahuano, siendo esta última la de mayor infraestructura y capacidad. De acuerdo a la política de mejoramiento continuo del astillero, este estudio busca generar un método de solución basado en la programación lineal que permita realizar una programación eficiente de grúas en los Astilleros y Maestranza de la Armada de Talcahuano.

- Descripción del problema.

El problema de programación de grúas en terminales portuarios ha sido un tema

frecuentado por los investigadores, los cuales se empeñan en hacer un mejor uso de las grúas, para así mejorar el funcionamiento del puerto, acelerando el flujo de naves que atracan en él, siendo ésta una de las medidas de desempeño más importantes para medir la calidad del terminal portuario. Al igual que en los puertos, los astilleros también disponen de un número de grúas, las cuales deben realizar una serie de trabajos a contra – reloj; es por ésto que tomamos como referencia trabajos como el de Kang et al. (2006) que desarrollan modelos para programar grúas de yarda (enrielladas). En Daganzo (2002), se examina la programación de la grúa para los puertos. Inicia con un caso determinísticos simple y lo utiliza como un elemento básico para desarrollar una comprensión del problema dinámico. En Sammarra, et al. (2007), se plantea una heurística de búsqueda tabú para el problema de programación cuadrática a grúas en un muelle (QCSP), cuyo problema consiste en un número fijo de grúas de muelle para carga y descarga de contenedores hacia y desde un buque. Además Hooker (2006), propone un modelo que busca

* Capitán de Fragata ING.NV.MC.

disminuir la tardanza de los trabajos, así como también disminuir el número de trabajos atrasados. Para esto se vale del uso de Programación Lineal Mixta MILP acompañado de la programación de restricciones CP. Esta propuesta híbrida resulta ser mucho más rápida en su resolución que los modelos que adoptan sólo una de las herramientas por sí misma, de acuerdo al estado del arte en la actualidad.

La mayoría de los trabajos relacionados con el tema están formulados como Job Shop, un ambiente donde hay trabajos que cuentan con diferentes números de operaciones y siguen distintas rutas por las máquinas o centros de trabajo, al contrario del problema que enfrentamos nosotros, el cual se asemeja más a un ambiente de máquinas paralelas. Aquí, una tarea puede ser ejecutada por cualquiera de las máquinas (grúas) que se encuentran en el astillero, con un tiempo de proceso que no será modificado por elegir una máquina u otra. El caso en estudio se desarrolla bajo este ambiente.

El modelo que nosotros implementaremos para resolver el problema de programación de grúas, está basado en el que propone en Hooker (2006) utilizando Programación Lineal Mixta como herramienta de trabajo.

- **Modelo matemático.**

Se propone un modelo matemático que busca minimizar la tardanza sujeta a la disponibilidad horaria de las grúas y el tiempo de utilización de las mismas.

Por otro lado, se presenta un criterio de priorización en donde aquellas solicitudes consideradas por el astillero más importante según el criterio predefinido. Para ello existe un factor de prioridad valorizado, considerando así un modelo matemático con una función objetivo que consta de minimización de tardanza ponderada.

El modelo que proponemos (variables, función objetivo y sus restricciones) para solucionar el problema se muestra a continuación. Sean los conjuntos:

$J = \{1, \dots, n\}$ el conjunto de solicitudes o tareas a programar.

$I = \{1, \dots, m\}$ el conjunto de grúas disponibles.

$I_s = \{1, \dots, s\}$, con $I_s \subseteq I$, el conjunto de grúas subcontratadas disponibles.

$T = \{1, \dots, T\}$, el conjunto de períodos disponibles, donde $t = 1$ es el instante 00:00 horas, $t = 2$ es el instante 01:00 horas, 23 es el instante 23:00 horas.

- **Variables de decisión.**

L_j : Indica si la tarea $j \in J$ está o no atrasada, tiene valor 1, si a tarea $j \in J$ está atrasada o valor 0 en caso contrario.

X_{ijt} : Identifica si se asigna la grúa $i \in I$ a la tarea o solicitud $j \in J$ en el período $t \in \bar{T}$, tiene valor 1, si es la grúa $i \in I$ es asignada a la solicitud $j \in J$ en el período $t \in \bar{T}$ o valor 0, en caso contrario.



• **Parámetros.**

P_j : Tiempo de proceso de solicitud $j \in J$, en horas.

d_j : Hora máxima de entrega de solicitud $j \in J$.

O_i : Capacidad en toneladas de la grúa $i \in I$.

R_j : Requerimiento de capacidad en toneladas de la solicitud $j \in J$.

D_{ij} : Tiene valor 1, si la grúa $i \in I$ puede atender la solicitud $j \in J$ o valor 0, en otro caso.

W_j : Prioridad o peso de la solicitud $j \in J$. Los valores de w_j van desde 1 a 10, de acuerdo a las necesidades del astillero.

El modelo propuesto en este estudio es el siguiente:

• **Modelo matemático.**

$$\text{Min } \sum_{j=1}^n L_j W_j \tag{1}$$

$$\sum_{i \in I} (t + p_j) x_{ijt} - d_j \geq T L_j ; \forall j \in J, t \in \bar{T} \tag{2}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in \bar{T}} x_{ijt} = 1 ; \forall j \in J \tag{3}$$

$$\sum_{j \in J} R_j X_{ijt} \leq O_i ; \forall i \in I, t \in \bar{T} \tag{4}$$

$$x_{ijt} \leq D_{ij} ; \forall i \in I, j \in J, t \in \bar{T} \tag{5}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in S} x_{ijt} \leq 1 ; \forall i \in I, t \in \bar{T} \tag{6}$$

$$\text{con } S = \{t' \in \bar{T} / \max(t-p_j, 0) < t' \leq t\}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in \bar{T}} x_{ijt} p_j \geq 8 ; \forall i \in I_S \tag{7}$$

$$x_{ijt} = 0 ; \forall i \in I, j \in J \quad \forall t \in \bar{T} \setminus t > T - p_j \tag{8}$$

donde T = número total de períodos

$$x_{ijt} = 0 ; \forall i \in I, j \in J \quad \forall t \in \bar{T} \setminus t > H - p_j \tag{9}$$

donde H = hora arbitraria

• **Descripción del modelo.**

➤ La expresión (1) corresponde a la función objetivo, la cual pretende minimizar el número total de tareas atrasadas, ponderadas de acuerdo a su clasificación de importancia.

➤ La expresión (2) establece que una tarea es considerada atrasada si no cumple con su *due date* u hora tope de entrega.

➤ La expresión (3) establece que todas las tareas deben ser asignadas a los períodos disponibles, aún cuando éstos estén atrasados.

➤ La expresión (4) establece que la capacidad en tonelaje de la solicitud no debe sobrepasar la capacidad de la grúa.

➤ La expresión (5) hace referencia a la posibilidad de asignar una grúa a un trabajo sólo si esta asignación es considerada como factible por el experto.

➤ La expresión (6) establece que una grúa no puede ser ocupada por otra solicitud mientras está en proceso. (Restricción de continuidad).

➤ La expresión (7) establece que cada tarea subcontratada debe tener un mínimo de 8 horas de uso.

➤ La expresión (8) no permite realizar asignaciones más allá de la jornada.

➤ La expresión (9) corresponde a un conjunto de restricciones arbitrarias auxiliares en caso de restringir ciertas horas en las cuales no puede haber asignaciones, se espera utilizar para las jornadas laborales interrumpidas e inclusive para considerar descansos y/o períodos de almuerzo.

- **Instancias utilizadas.**

- 1.-
- # Grúas: 3
- # Tareas: 5
- # Períodos: 12

Grúas	1	2	3
$O(j)$	20	60	40

Datos de entrada para grúas instancia 1.

Tareas	1	2	3	4	5
$R(j)$	10	30	40	50	60
$d(j)$	5	5	10	8	8
$p(j)$	2	5	5	6	6

Datos de entrada para tareas o solicitudes instancia 1.

Debido a restricciones físicas, la solicitud número 3 sólo puede ser ejecutada por la grúa subcontratada.

$D(i,j)$	1	2	3	4	5
1	1	1	0	1	1
2	1	1	0	1	1
3	1	1	1	1	1

Matriz de factibilidad grúa-tarea instancia 1.

- **Otros antecedentes.**

- Se tienen 3 grúas de las cuales la última grúa es subcontratada, por lo que es necesario que ella sea utilizada por al menos 8 horas durante la jornada.

La solicitud 3 sólo puede ser asignada a la grúa subcontratada.

- 2.-
Grúas: 23
Tareas: 50
Períodos: 24

Grúas	15, 15, 13, 28, 50, 50, 4, 4
$O(j)$	6, 6, 6, 6, 20, 20, 30, 30 30, 30, 40, 13, 50, 90, 200

Datos de entrada grúas instancia 2.

Tareas	
$R(j)$	20, 25, 30, 10, 5, 5, 5, 2, 40, 30, 90, 150, 2, 3, 30, 10, 15, 25, 8, 6, 6, 4, 4, 2, 2, 50, 50, 40, 5, 5, 1, 1, 1, 80, 190, 4, 4, 20, 30, 25, 3, 3, 30, 3
$d(j)$	5, 24, 4, 6, 7, 9, 22, 12, 14, 14, 13, 15, 16, 20, 13, 20, 8, 15, 8, 21, 11, 17, 15, 16, 17, 10, 4, 18, 6, 4, 24, 19, 12, 9, 15, 24, 14, 12, 18, 10, 23, 24, 10, 6, 13, 15, 9, 22, 6, 22
$p(j)$	5, 15, 3, 3, 4, 2, 8, 8, 6, 11, 7, 9, 6, 12, 13, 10, 8, 4, 7, 18, 10, 12, 12, 14, 11, 9, 3, 9, 3, 2, 12, 12, 5, 6, 11, 15, 9, 4, 8, 8, 8, 5, 2, 4, 6, 6, 4, 9, 5, 7
$w(j)$	9, 7, 8, 10, 10, 7, 1, 2, 7, 5, 6, 7, 7, 1, 1, 9, 2, 1, 2, 10, 1, 2, 3, 2, 7, 4, 1, 4, 8, 8, 2, 1, 2, 9, 4, 10, 10, 9, 4, 5, 5, 2, 4, 8, 7, 8, 7, 3, 1, 6

Datos de entrada tareas o solicitudes instancia 2.

$D(i, j)$	$1, \forall i, \forall j$
-----------	---------------------------

Matriz factibilidad grúa-tarea para instancia 2.

- Se utilizan las 3 grúas que se pueden subcontratar.

- 3.-
Grúas: 23
Tareas: 50
Períodos: 35

Grúas	15, 15, 13, 28, 50, 50, 4, 4
$O(j)$	6, 6, 6, 6, 20, 20, 30, 30 30, 30, 40, 13, 50, 90, 200

Datos de entrada grúas instancia 3.

Tareas	
$R(j)$	20, 25, 30, 10, 5, 5, 5, 2, 40, 30, 90, 150, 2, 3, 30, 10, 15, 25, 8, 6, 6, 4, 4, 2, 2, 50, 50, 40, 5, 5, 1, 1, 1, 80, 190, 4, 4, 20, 30, 25, 3, 3, 30, 3
$d(j)$	5, 24, 4, 6, 7, 9, 22, 12, 14, 14, 13, 15, 16, 20, 13, 20, 8, 15, 8, 21, 11, 17, 15, 16, 17, 10, 4, 18, 6, 4, 24, 19, 12, 9, 15, 24, 14, 12, 18, 10, 23, 24, 10, 6, 13, 15, 9, 22, 6, 22
$p(j)$	5, 15, 3, 3, 4, 2, 8, 8, 6, 11, 7, 9, 6, 12, 13, 10, 8, 4, 7, 18, 10, 12, 12, 14, 11, 9, 3, 9, 3, 2, 12, 12, 5, 6, 11, 15, 9, 4, 8, 8, 8, 5, 2, 4, 6, 6, 4, 9, 5, 7
$w(j)$	9, 7, 8, 10, 10, 7, 1, 2, 7, 5, 6, 7, 7, 1, 1, 9, 2, 1, 2, 10, 1, 2, 3, 2, 7, 4, 1, 4, 8, 8, 2, 1, 2, 9, 4, 10, 10, 9, 4, 5, 5, 2, 4, 8, 7, 8, 7, 3, 1, 6

Datos de entrada tareas o solicitudes instancia 3.

$D(i, j)$	$1, \forall i, \forall j$
-----------	---------------------------

Matriz Factibilidad guías-tareas para instancias 3.

- Se utilizan las 3 grúas que se pueden subcontratar. Debido a una inauguración con importantes autoridades, las actividades deben detenerse desde las 13:00 horas hasta las 14:00 horas (conjunto de restricciones número 9). Se aumentó el número de períodos a asignar a 35 (valor arbitrario) con el objetivo de generar un modelo factible y comprobar si el modelo no se vuelve computacionalmente imposible al

aumentar la cantidad de variables considerablemente (se destaca que este cambio no afecta a la solución).

- Resultados.

Se diseñaron diversas instancias del problema, las cuales pretenden mostrar las diferentes cualidades que presenta el modelo y posteriormente fueron implementadas en el software IBM ILOG CPLEX 11.1 en una CPU Intel Core de 1.8 Ghz con 512 Mb en RAM.

En la tabla que se muestra a continuación se describe el conjunto de instancias de pruebas y los detalles de éstas.

Instancia	Función objetivo	Trabajos atrasados	Tiempo cpu (s)	¿Óptima?
1	2	2	< 0.1	Sí
2	1	1	< 0.1	Sí
3	2	1	< 0.1	Sí

Cuadro resumen instancias de prueba.

- Conclusiones.

Las múltiples pruebas e instancias revisadas comprueban en la práctica la eficacia del modelo presentado. Se enfatizó en poder cumplir con la cabalidad de las restricciones impuestas por el astillero naval.

Se espera a futuro considerar los siguientes puntos:

- Considerar *tiempos de setup* dependientes del estado.
- Generar un modelo previo para preasignar que separe en grupos de posible asignación, esto con el objetivo de utilizar grúas de manera más eficiente respecto de su costo de utilización.



REFERENCIAS

1. W.C. Ng. "Crane Scheduling in Container Yards with inter-crane Interference". *European Journal of Operational Research* 164 (2005) 64–78. Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong. Received 20 December 2002; accepted 12 November 2003.
2. Giorgio Corriga, Alessandro Giua, and Giampaolo. "An Implicit Gain-Scheduling Controller for Cranes". *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 6, No. 1, January 1998.
3. Kap Hwan Kim, Young-Man Park. "A Crane Scheduling Method for Port Container Terminals". Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Changjeon-dong, Kumjeong-ku, Pusan 609-735, South Korea. Received 22 January 2001; accepted 21 January 2003.
4. Andrew Lim, Brian Rodrigues, Fei Xiao, Yi Zhu. "Crane Scheduling with Spatial Constraints". 17 November 2003.
5. Hirofumi Matsuo, Jen S. Shang and Robert S. Sullivan. "A Crane Scheduling Problem in a Computer-Integrated Manufacturing Environment". Department of Management, Graduate School of Business University of Texas, Austin, Texas 78712 .
6. Chuqian Zhang , Yat-wah Wan , Jiyin Liu , Richard J. Linn. "Dynamic Crane Deployment in Container Storage Yards". 9 April 2001.
7. L. M. Gambardella, M. Mastrolilli, A.E. Rizzoli and M. Zaffalon. "An Optimization Methodology for Inter-modal Terminal Management". IDSIA- Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale, Galleria 2, CH-1928 Manno, Switzerland.
8. J. Hooker, "An Integrated Method for Planning and Scheduling to Minimize Tardiness," *Constraints*, vol. 11, Jul. 2006, págs. 139-157.
9. Ebru K. Bish. "A Multiple-Crane-Constrained Scheduling Problem in a Container Terminal". Department of Industrial and Systems Engineering, College of Engineering, Virginia Tech., 250 New Engineering Building (0118), Blacksburg, VA 24061, USA. 4 October 2001.
10. Hamdy A. Taha. "Investigación de Operaciones". Séptima edición University of Arkansas, Fayetteville , 2004.
11. C.F. Daganzo, "The crane scheduling problem", *Transportation Research Part B* 23 (1989).
12. C.F. Daganzo, "Crane productivity and ship delay in ports", *Transportation Research Record* 1251 (1990).
13. K.Y. Kim, K.H. Kim, "A routing algorithm for a straddle carrier to load export containers onto a container-ship" *International Journal of Production Economics* 59 (1999).
14. Peterkofsky, R.I., Daganzo, C.F., 1990. "A branch and bound solution method for the crane scheduling problem". *Transportation Research*.
15. Ricardo Adrián Becerra Isla. "Una propuesta de optimización online para la programación de salas quirúrgicas en un servicio de salud pública". Informe de Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Chile, octubre 2007.
16. Denis Contreras Gallardo. "Asignación de carga en bodegas de SVTI S.A. una propuesta de solución". Informe de Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Concepción, Chile, Marzo 2007.