

# De la localización de torres grúa

*Caso de una grúa. Caso de grúas móviles. Caso de varias torres grúa.*

## Caso de una grúa

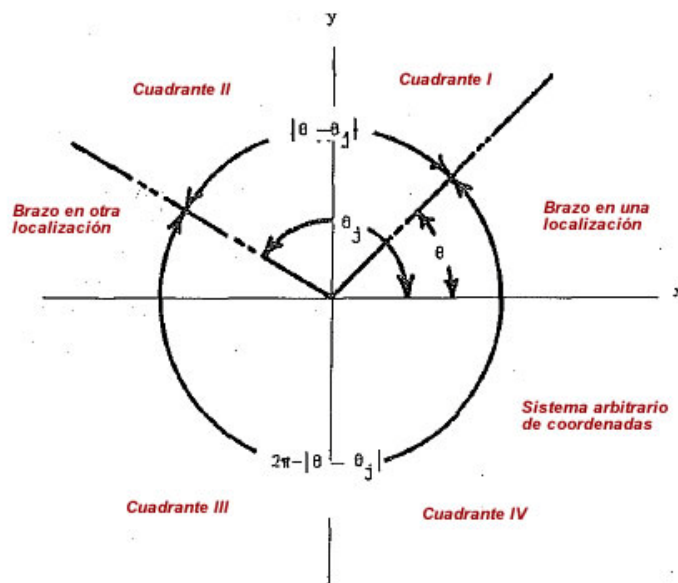
### Referencia

Walter E. Rodríguez-Ramos (University of Central Florida, Orlando, Florida) and Richard L. Francis (University of Florida, Gainesville, Florida). *Single Crane Location Optimization*. Journal of Construction Engineering and Management. Vol 109, N° 4, December, 1983. ASCE.

El propósito del estudio es desarrollar un modelo para la localización óptima de una grúa en un sitio de construcción. La función objetivo por optimizar es el costo total mínimo de transporte entre la grúa y las facilidades de la construcción atendidas por la grúa. El modelo considera movimientos radiales y angulares de los materiales de construcción. El modelo incluye un procedimiento gráfico para facilitar su uso.

### Introducción

El problema abordado por el estudio es de importancia en el planeamiento de la construcción de una obra pues concierne a la localización de una sola torre grúa estacionaria, en relación con las facilidades previstas de la construcción. Se ha buscado una aproximación sencilla que incluso puede desarrollarse gráficamente a partir de la visualización del lugar.

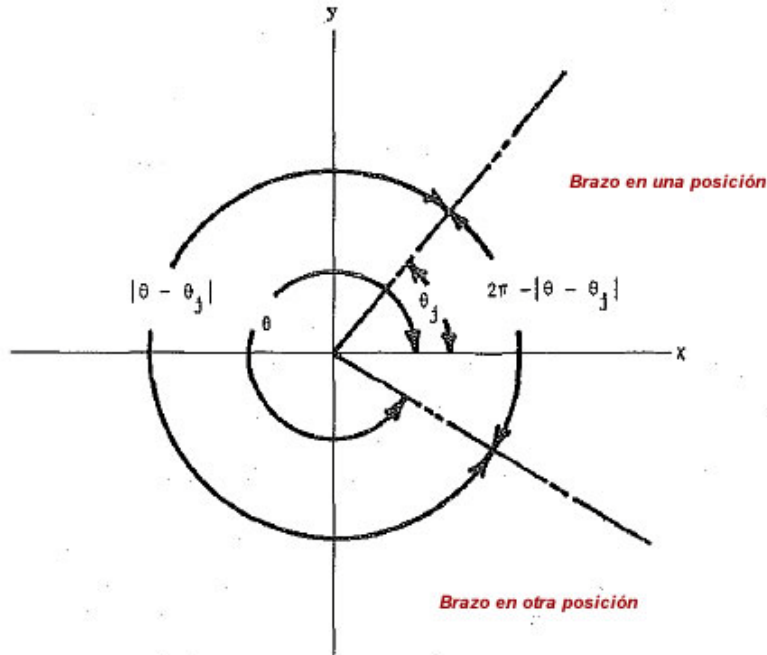


**MOVIMIENTO ANGULAR DEL BRAZO DE LA GRÚA ENTRE LOS CUADRANTES I A II**

La formulación del modelo está basada en el análisis del movimiento del brazo (pluma o asta) en relación con un sistema de coordenadas polares. La localización es propiamente la posición del gancho de la grúa cuando espera entre movimientos.

### Formulación y análisis

Se asume que los ejes del sistema están elegidos de tal manera que el mástil de la grúa constituye el origen del sistema de coordenadas polares. Los movimientos angulares se grafican entre cuadrantes. Por ejemplo, en la figura anterior se grafica el movimiento entre los cuadrantes I a II. Pero también puede ser entre I y IV como se indica en la figura siguiente.



**MOVIMIENTO ANGULAR DEL BRAZO DE LA GRÚA ENTRE LOS CUADRANTES I A IV**

En cada caso, el movimiento puede ser medido ya sea por  $|\theta - \theta_j|$  o por  $[2\pi - |\theta - \theta_j|]$ , según el movimiento del brazo o pluma. Por supuesto que el movimiento angular debe ser el mínimo o menor, entre las dos rutas posibles. Este movimiento angular mínimo,  $A_j(\theta)$ , puede ser expresado como:

$$A_j(\theta) = \min\{|\theta - \theta_j|, 2\pi - |\theta - \theta_j|\}$$

Considérese que se trata de  $n$  facilidades de la construcción localizadas en  $(\theta_j, r_j)$ , tal que  $j=1, 2, \dots, n$ . Sea  $(\theta, r)$  la localización del gancho de la grúa. El objetivo es encontrar la localización óptima  $(\theta^*, r^*)$  que minimice el transporte total entre el gancho de la grúa, y todas las facilidades que serán apoyadas.

Se define  $W_j$  como un **factor del costo de transporte**. Para una cierta facilidad  $j$ , este factor  $W_j$  es igual al costo por unidad angular o tiempo de viaje radial, multiplicado por el número estimado de viajes o ciclos hechos en un cierto periodo entre la localización desconocida de la grúa y la facilidad de la construcción que se está apoyando. La unidad de tiempo puede ser expresada en segundos o minutos y el periodo de tiempo en horas, días, o semanas.

El carro de la pluma se mueve a una velocidad angular  $V_a$  (en rad/s), y a una velocidad radial  $V_R$  (en m/s). **Se asume que los movimientos radial y angular del carro de la pluma son efectuados en forma consecutiva.** La distancia radial recorrida por el carro de la pluma es  $|r - r_j|$ . Así, el **tiempo de viaje** entre la posición óptima del gancho (que no se conoce), y la facilidad existente a ser atendida, resulta:

$$t = \frac{A_j(\theta)}{V_a} + \frac{|r - r_j|}{V_R}$$

El costo total de transporte puede ser representado por:

$$F(\theta, r) = \sum_{j=1}^n W_j \left( \frac{A_j(\theta)}{V_a} + \frac{|r - r_j|}{V_R} \right) = F_1(\theta) + F_2(r)$$

En el cual, los dos sumandos pueden ser tratados en forma independiente.

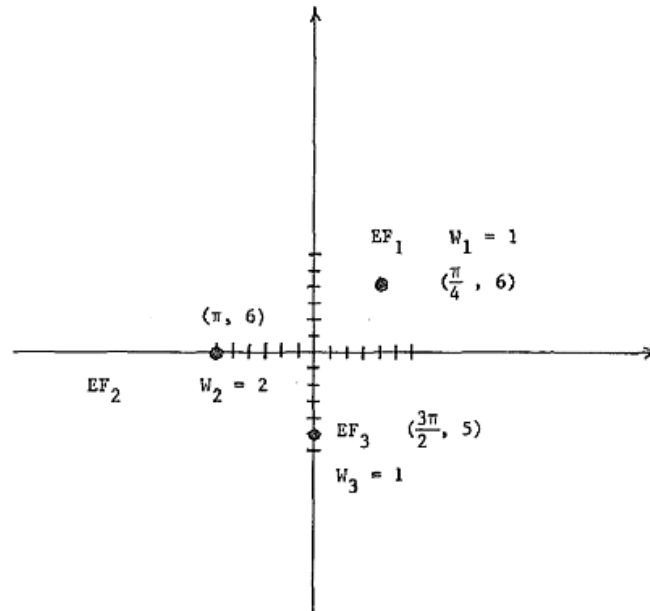
$$F_1(\theta) = \sum_{j=1}^n W_j \frac{A_j(\theta)}{V_a} = \sum_{j=1}^n \left( \frac{W_j}{V_a} \right) A_j(\theta)$$

$$F_2(r) = \sum_{j=1}^n W_j \frac{|r - r_j|}{V_R} = \sum_{j=1}^n \left( \frac{W_j}{V_a} \right) |r - r_j|$$

Minimizando el primer sumando, se obtiene  $\theta^*$ . Minimizando el segundo, se obtiene  $r^*$ , resultando en  $(\theta^*, r^*)$ . Y el costo total mínimo:

$$F(\theta^*, r^*) = F_1(\theta^*) + F_2(r^*)$$

## Ejemplo



**LOCALIZACIÓN DE LAS FACILIDADES EXISTENTES, EF**

Se trata de tres facilidades que serán apoyadas.  $EF_1$  en la localización  $(\pi/4, 6)$ .  $EF_2$  en la localización  $(\pi, 6)$ .  $EF_3$  en  $(3\pi/2, 5)$ . Se considera los siguientes valores:  $W_1=1$ ,  $W_2=2$ ,  $W_3=1$ ,  $V_a=1$ ,  $V_R=1$ . Las fórmulas resultan:

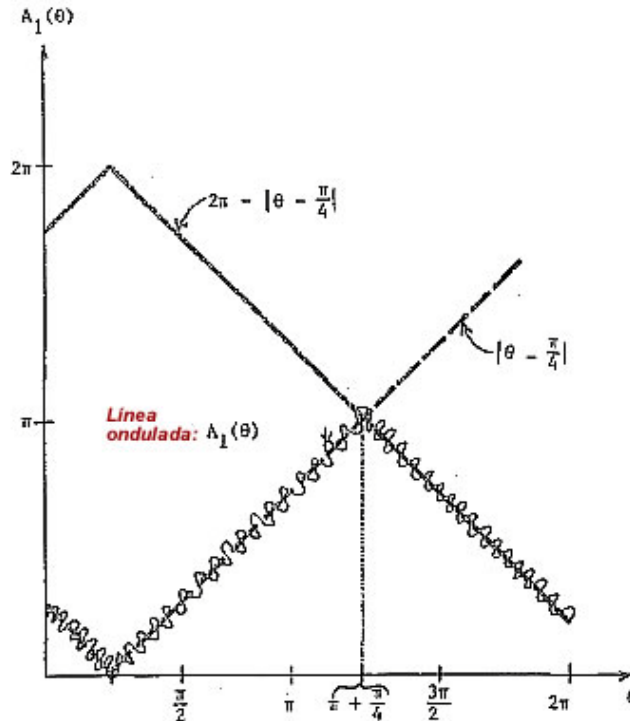
$$F(\theta, r) = 1 \left( \frac{A_1(\theta)}{1} + \frac{|r-6|}{1} \right) + 2 \left( \frac{A_2(\theta)}{1} + \frac{|r-6|}{1} \right) + 1 \left( \frac{A_3(\theta)}{1} + \frac{|r-5|}{1} \right)$$

$$F_1(\theta) = A_1(\theta) + 2A_2(\theta) + A_3(\theta)$$

$$F_2(r) = \left( \frac{|r-5|}{1} \right) + 3 \left( \frac{|r-6|}{1} \right)$$

El estudio aplica un procedimiento gráfico para  $\theta_j$ . Se grafican los valores posibles para cada  $A_j(\theta)$  y después se combinan para encontrar el mínimo  $F_1(\theta)$ . Por ejemplo en el caso de:

$$A_1(\theta) = \min \left( \left| \theta - \frac{\pi}{4} \right|, 2\pi - \left| \theta - \frac{\pi}{4} \right| \right)$$



**GRÁFICO  $A_1(\theta)$**

Para encontrar el óptimo en  $r$ , el estudio aplica valores promedio de los  $r_j$ .

De esta manera encuentra los valores óptimos:

$$\theta^* = \pi \quad r^* = 6 \quad F_1(\theta^*) = 1 - \frac{1}{4}\pi \quad F_2(r^*) = 1$$

## Caso de grúas móviles

### Referencia

Mohamed Al-Hussein (University of Alberta, Edmonton, Canada), Sabah Alkass (Concordia University, Montreal, Canada), and Osama Moselhi (Concordia University, Montreal, Canada). *Optimization Algorithm for Selection and on Site Location of Mobile Cranes*. Journal of Construction Engineering and Management. Vol 131, N° 5, May 1, 2005. ASCE.

Los fabricantes de grúas móviles proporcionan cuadros de información de la capacidad de las mismas. Esta información se basa en una **configuración** determinada que toma en cuenta: **longitud de mástil y pluma, radio de elevación, altura de elevación, ángulo del mástil respecto al suelo, y ángulo de la pluma respecto al mástil y al suelo**. Sin embargo, la práctica puede demandar trabajos en condiciones distintas a las previstas en los cuadros de información. En este artículo se presenta un algoritmo de optimización (llamado *algoritmo-2*) para seleccionar y localizar grúas móviles en los sitios de construcción, para minimizar la longitud del mástil, y/o el radio mínimo, según las exigencias mayores de carga. El algoritmo está incorporado en un sistema de computación que incluye también los datos para distintas configuraciones de grúas móviles. En el artículo, el uso del algoritmo se ilustra con varios ejemplos.

## Introducción

Las configuraciones que se pueden encontrar en los cuadros de información de los fabricantes, se basan en consideraciones como las siguientes.

- Los radios de levantamiento están comúnmente definidos en incrementos de 3 m.
- Las longitudes de los mástiles están expresados en incrementos según la longitud de la sección. Se asume que las grúas hidráulicas operan con las secciones del mástil totalmente extendidas.
- El reticulado del mástil, y las longitudes extensibles de la pluma, están basadas en el número de secciones disponibles para un mástil en particular, o para una extensión de pluma en específico.

En la práctica, las condiciones pueden ser diferentes. Los operadores pueden encontrar aplicaciones de computación (que el estudio considera que están basadas en lo que llama *algoritmo 1*) para seleccionar y utilizar grúas. El artículo propone un nuevo programa de optimización, que llama *algoritmo 2*, según las diferencias que pueden apreciarse en el siguiente cuadro.

---

### Pasos y comparación entre el *algoritmo 1* y el *algoritmo 2*

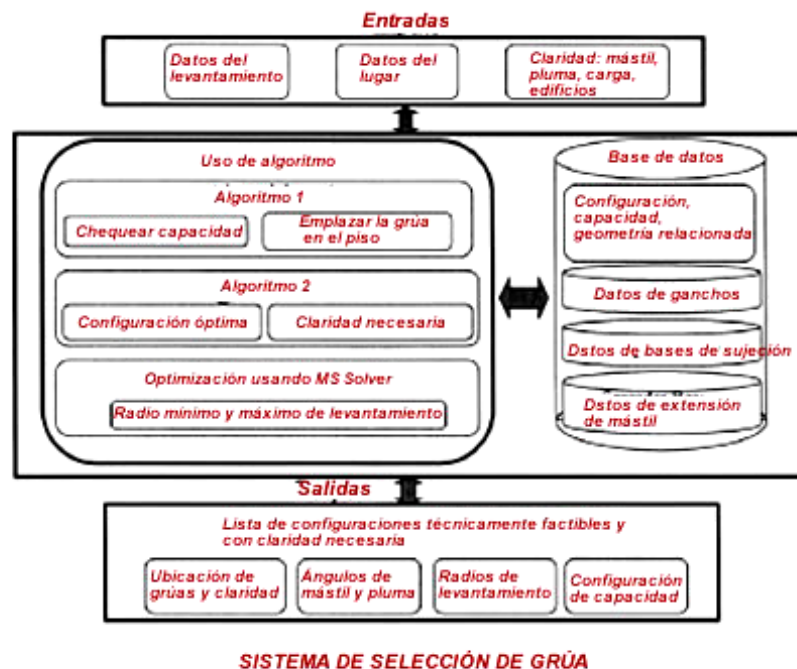
---

Paso	Algoritmo 1	Algoritmo 2
1	Verifica la capacidad de carga de la grúa. Lista todas las configuraciones almacenadas en la base de datos que tienen la capacidad de llevar el peso total en el levantamiento.	Usa el algoritmo 1.
2	Verifica que la grúa es adecuada al sitio. De la lista generada en el paso anterior, elimina aquellas que no pueden emplazarse en el sitio.	Usa el algoritmo 1.
3	Verificar el distanciamiento libre entre el mástil de la grúa y la pluma. De la lista del paso anterior, obtener el mástil, la pluma, los radios de	Determinar la longitud óptima mástil/pluma. Para la configuración seleccionada por el usuario en el paso 2, calcula la mínima longitud del mástil que satisface las

Pasos y comparación entre el *algoritmo 1* y el *algoritmo 2*

Paso	Algoritmo 1	Algoritmo 2
	levantamiento, y el ángulo del mástil al suelo, para eliminar las configuraciones que violan las exigencias de claridad (espacios libres) entre el mástil, la pluma, la carga y los edificios adyacentes.	exigencias de claridad, proporcionadas por el usuario, entre el mástil y la pluma respecto a la carga y los edificios vecinos.
4		Determinar los radios correspondientes. Para la configuración del paso 3, calcular el correspondiente radio mínimo.
5		Para la configuración seleccionada en el paso 3, calcular la claridad del mástil y la pluma respecto a la carga y a los edificios adyacentes.
6		Para la configuración seleccionada en el paso 3, calcular el correspondiente radio, mínimo y máximo. Facilita la preparación de planes de levantamiento de carga.

**Algoritmo propuesto**



El algoritmo 2 toma en cuenta las características geométricas de la grúa, el levantamiento, y el lugar, representándolos en un juego de ecuaciones

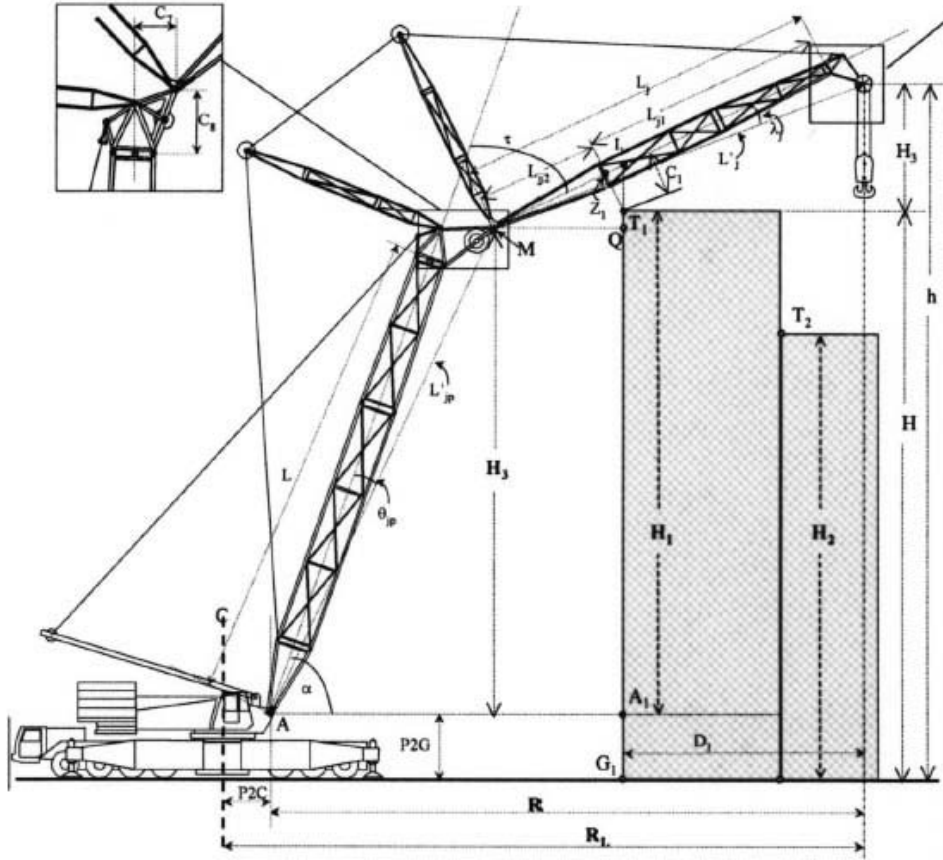
trigonométricas no lineales. La optimización es llevada a cabo utilizando derivadas parciales de estas ecuaciones. El proceso fue codificado usando MS Visual Basic, desarrollando un módulo denominado *MS Solver*. Se integra con una base de datos, con la que se relaciona según la figura adjunta. Los mismos autores han desarrollado y publicado una base de datos (que denominan *D-Crane*) sobre configuraciones de grúas.

### Ejemplos desarrollados

El estudio reporta varios modelos de grúas que fueron utilizados en el estudio. Se presentan algunos de ellos. Los gráficos indican el tipo de información considerada para la optimización.

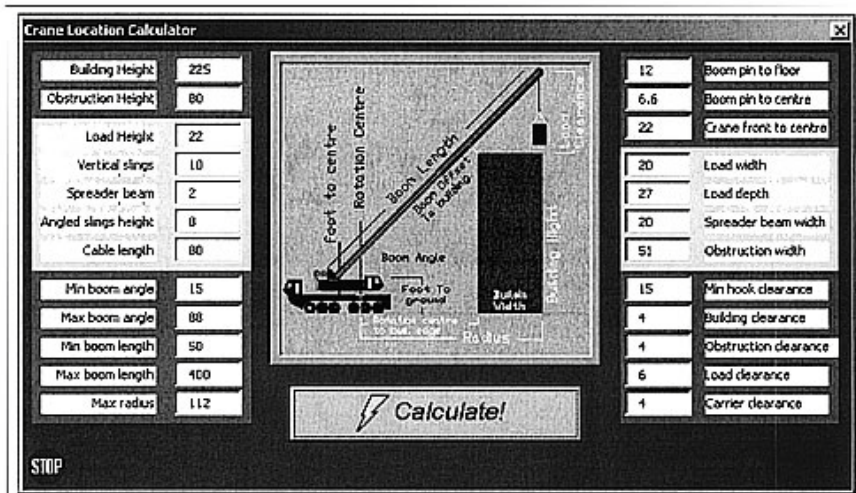


CASO DE GRÚA ESTUDIADA EN EL ARTÍCULO



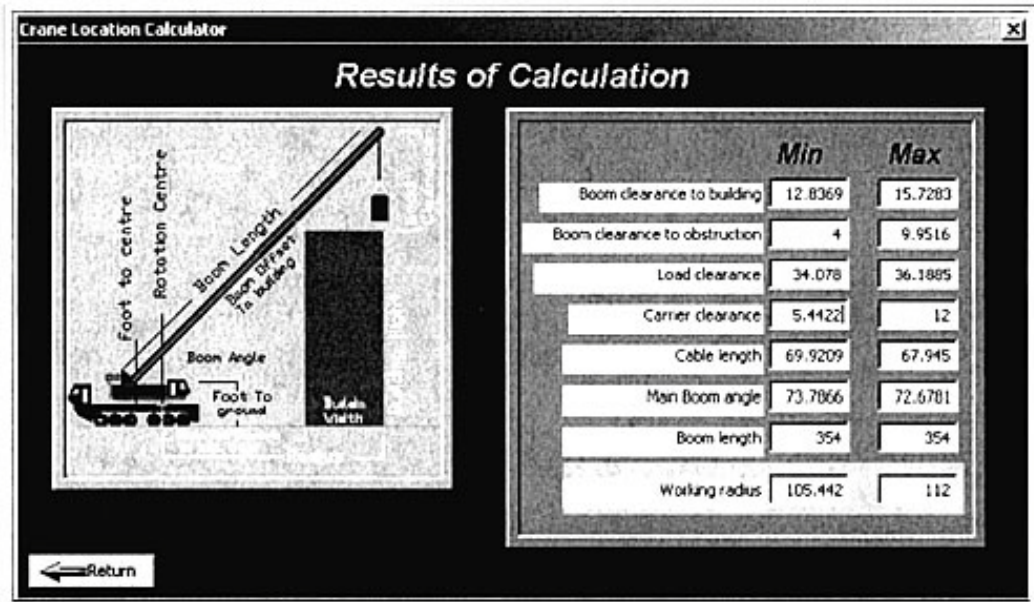
CASO DE GRÚA CON EDIFICIOS DE DIFERENTES ALTURAS

### Del software



VENTANA PARA INGRESO DE DATOS

Se ilustra una pantalla del programa para el ingreso de la información, así como otra con los resultados.



VENTANA DE RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN

## Caso de varias torres grúa

### Referencia

P. Zhang, F. C. Harris, P. O. Olomolaiye, and G. D. Holt (University of Wolverhampton, Wolverhampton, U. K.). *Location Optimization for a Group of Tower Cranes*. Journal of Construction Engineering and Management. Vol 125. N° 2, March/April, 1999. ASCE.

El artículo presenta un modelo computarizado para la localización óptima de un grupo de torres grúa. Los criterios de localización son: trabajo equilibrado, mínima probabilidad de conflictos entre grúas, y alta eficiencia de operación. Se presenta en *tres* sub-modelos. En el *primero*, el modelo de localización inicial clasifica las tareas en grupos e identifica las localizaciones posibles de cada grúa de acuerdo a su cercanía geométrica. En el *segundo* modelo, el grupo anterior es ajustado afinando las cargas de trabajo y los mínimos conflictos. En el *tercero*, un modelo de optimización para una sola torre, es aplicado torre por torre para una óptima localización en términos de un mínimo tiempo de transporte del gancho.

### Introducción

En grandes proyectos de construcción suele ser necesario recurrir al uso de varias grúas, especialmente si la programación es ajustada. No siempre es posible localizar las grúas alejadas unas de otras, debiendo considerarse interferencias de trabajos por áreas limitadas, y los consiguientes riesgos de colisión.

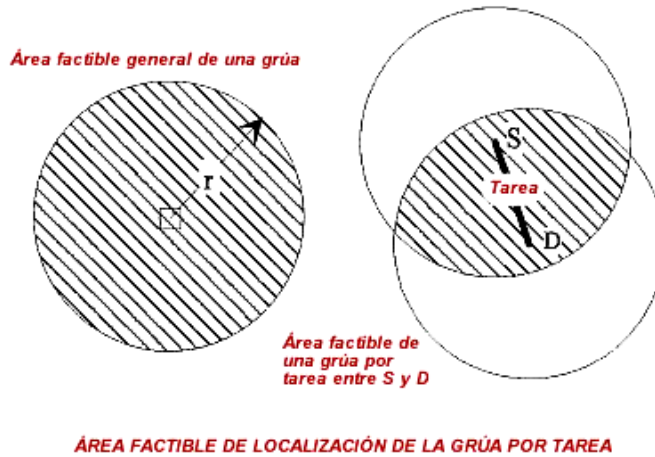
Previamente a este estudio, se han observado 14 lugares con uso intensivo de grúas: 4 en China, 6 en Inglaterra, y 4 en Escocia. Se efectuaron estudios de tiempo, y se recogió información sobre cobertura de áreas, cartas de balance de trabajo, y condiciones del terreno. Ello condujo a las siguientes consideraciones:

- El tipo y número de grúas, son conocidos.
- Trazado geométrico de todos los suministros, S, y puntos de demanda, D.

- Para cada par S-D, se conocen los niveles de demanda.
- La duración de la construcción es similar en las distintas áreas de trabajo.
- El material transportado en un par S-D, es llevado a cabo por una sola grúa.

## Modelo inicial de generación de localización

### ◆ Capacidad de carga

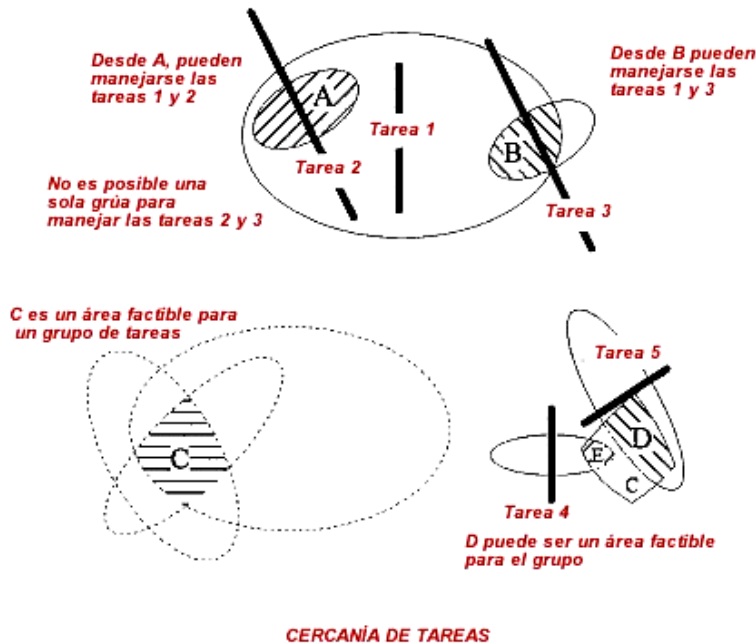


La capacidad de carga de una grúa se define por el peso  $w$ , y el radio,  $r$ . Una grúa es de uso inviabile si no está en el círculo correspondiente al radio  $r$ . Además, para cumplir con el encargo de recibir el suministro S para atender la demanda D, la grúa debe estar localizada en el área elíptica de la figura. Toma en

cuenta la distancia entre S y D, así como la capacidad de carga de la grúa.

### ◆ Medida de cercanía de las tareas

Pueden darse varios casos entre áreas factibles por tareas: estar enteramente encerrada por otra, tener áreas con intersección parcial, y áreas totalmente separadas. La cercanía puede ser medida por el tamaño del área de traslape (A es mayor que B, en el caso de la figura).



◆ **Grupos de tareas en clases separadas**

Donde no hay superposición de áreas, se requiere de grúas separadas. De otra forma, cuando hay múltiples elecciones, se eligen las áreas factibles más pequeñas como parte de las tareas iniciales de un grupo. Así, por facilidad, el modelo requiere de un trazado gráfico de tareas con una lista del tamaño de áreas factibles.

Después de elegir el primer grupo, el modelo busca las tareas más cercanas, chequeando nuevamente las áreas de superposición, adoptando el criterio de seleccionar las áreas más pequeñas. Con este criterio, la aplicación del modelo permite la formación de un grupo de grúas. El proceso se repite si es necesario formar más grupos. El arreglo final permite el trazado de nuevas áreas de superposición.

**Modelo de asignación de tareas**

Según el paso anterior, se han asignado grúas en relación con la cercanía geométrica. Sin embargo, podría suceder que algunas resulten más cargadas que otras. Además, algunas interferencias pueden ser más frecuentes que otras.

◆ **Matriz de accesibilidad**

A partir de la configuración inicial, se prepara la siguiente matriz de accesibilidad que relaciona cada grúa a sus tareas asignadas, con la siguiente valoración.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la grúa } i \text{ puede manejar el trabajo } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, I \quad j = 1, 2, \dots, J$$

Matriz de accesibilidad

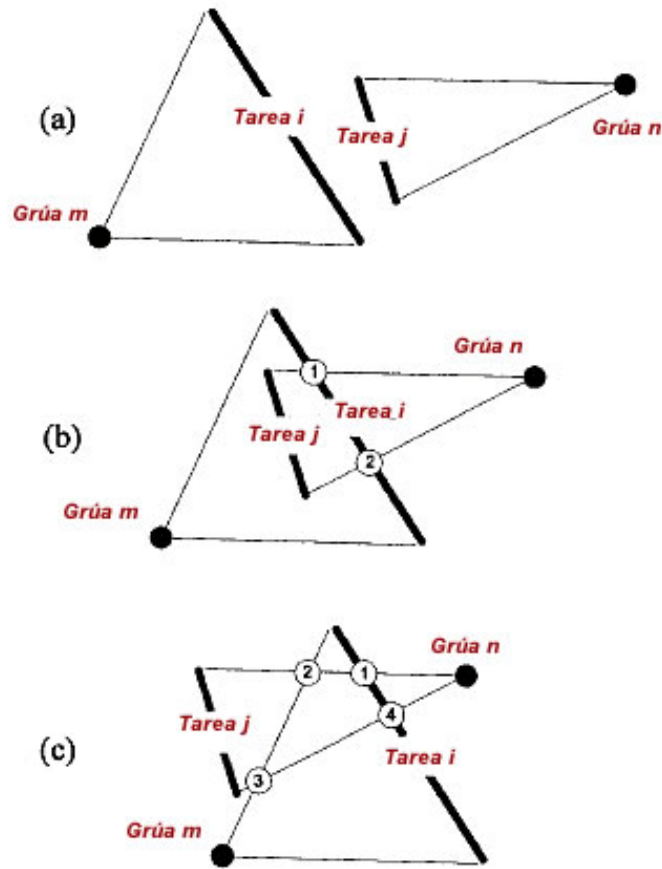
Grúas	Tareas					
	Tarea 1	Tarea 2	...	Tarea j	...	Tarea J
Grúa 1	$\delta_{11}$	$\delta_{12}$				
Grúa 2	$\delta_{21}$	$\delta_{22}$				
...						
Grúa i				$\delta_{ij}$		
...						
Grúa I						$\delta_{IJ}$

◆ **Asignación de tareas**

El modelo considera dos criterios para esta asignación: el equilibrio de trabajos (en términos del tiempo para cada grúa), y la menor posibilidad de conflictos.

El estudio de *trabajo equilibrado* es presentado en el artículo, es medido por la desviación estándar de los tiempos de transporte de cada grúa. Considera la accesibilidad, los tiempos de levantamiento, y el número de veces que se hace este levantamiento.

El estudio introduce también un *índice de conflictos*, el cual se determina gráficamente por la intersección de los triángulos representativos de las tareas, ponderadas por el número de veces de realización del levantamiento.



**CASOS DE SEVERIDAD DE CONFLICTOS**

### Modelo de localización de una grúa

El artículo reporta el uso del método de simulación de Montecarlo para determinar la posición exacta de la grúa, en términos del trazado espacial y la frecuencia de tareas, sin afectar la conformación de los grupos.

### Ejemplo

El estudio desarrolla un ejemplo hipotético. Se trata de una edificación de concreto armado con un piso de trabajo de 35 m de alto, incluyendo un elevador. S1 y S4 son puntos para cargar concreto. S3 y S5 son talleres de refuerzo. S2 y S6 son campos para el encofrado. S7, S8 y S9 son plataformas de carga de recepción del encofrado esperando ser elevado al piso de trabajo. La figura ilustra esta disposición y los resultados reportados por el estudio al aplicar el método que propone.

