

# IEE2613 Control Automático 1-2020

## Proyecto Grúa Enunciado para Entrega Final

### OBJETIVO

El objetivo del proyecto es que usted se enfrente a un problema real de control de un sistema no lineal de manera de complementar los contenidos revisados en el curso.

### DESCRIPCIÓN

El proyecto consiste en controlar los movimientos de una grúa (ver figura 3) con el objetivo de mover una carga (bloque rojo) de un lugar a otro en el menor tiempo posible, con un mínimo de sobreoscilaciones y respetando los límites mecánicos del sistema.

Se deben observar los límites físicos de torque y potencia máxima que los motores de elevación y azimut son capaces de entregar.

En esta etapa del proyecto, deberá diseñar y programar, en forma libre, un sistema de control de elevación, azimut y traslación de la flecha.

En un modelo simplificado, la grúa a ser controlada está formada por las siguientes partes:

- Base: Camión anclado firmemente a tierra.
- Pistón: Pistón con émbolo o flecha de masa  $M_f$  y largo  $L_f$  y cilindro o brazo de masa  $M_b$  y largo  $L_b$ . Este dispositivo permite ajustar el radio de alcance.
- Carga: Masa metálica (masa  $M$ ) adosada a un atractor magnético. Se asume que está rígidamente firme al extremo de la flecha, sin movimientos de traslación o rotación. Se puede asumir que su centro de masa está al final de la flecha y sobre el eje longitudinal de ésta.

Existen tres **motores** a los cuales usted tendrá acceso:

- Motor de elevación: provee movimiento rotacional en elevación mediante un torque  $T_\alpha$ .
- Motor de azimut: provee movimiento rotacional en azimut mediante un torque  $T_\beta$ .
- Motor de desplazamiento lineal: provee movimiento longitudinal de la flecha respecto del brazo a través de una fuerza  $F_f$ .

La grúa posee tres **sensores** que permiten medir la posición angular del brazo en elevación y azimut y un sensor que mide el desplazamiento de la flecha respecto al brazo.

### SEGUNDA ENTREGA: CONTROL DE LA GRÚA

El objetivo es controlar -vía realimentación- el movimiento de la grúa, para alcanzar objetivos tales como bajos tiempos de respuesta, evitar golpear los extremos de rangos, ausencia de movimientos bruscos, sobre-oscilaciones pequeñas, economía, etc. El control debe realizarse considerando cambios a un vector de *setpoints* que definen un punto en el espacio en elevación, azimut y radio. El controlador también deberá compensar perturbaciones externas desconocidas como el peso de la carga, viento, cambio en roce, variaciones en torques y fuerzas máximas, etc.

### Modelo común

En el sitio SIDING del curso, en carpeta “Proyecto Grúa”, se encuentra un comprimido “**Proyecto\_Segunda\_Parte.zip**” con el código de un modelo desarrollado por los ayudantes del curso sobre el cual los alumnos deberán probar sus controladores. El modelo se ha simplificado para mejorar su robustez numérica y reducir tiempo de cálculo.

Los archivos son:

- **Enunciado Proyecto Entrega Final.pdf:** Enunciado con instrucciones para segunda parte del Proyecto
- **grua.m:** ecuaciones dinámicas de grúa (simplificadas)
- **Newsensors.m:** interfaz entre grúa/sensores/controlador
- **simula\_grua.m:** simulación de caso en lazo abierto (ejemplo de uso)

El código del modelo se entrega abierto, pudiendo ser modificado y usado por los alumnos para probar sus controladores. **Sin embargo, la evaluación final de los controladores se hará sobre el modelo original considerándolo una ‘caja negra’, es decir, los alumnos no lo podrán modificar.**

## El Controlador

En la figura 1, el desarrollo de bloque “Controlador Digital  $K(z)$ ” será tarea de los alumnos y la caja negra “Grúa” corresponde al modelo que se les entregará y sobre el cual se evaluará la calidad del controlador.

**El controlador no podrá depender de los setpoints, pues éstos se desconocen hasta el instante mismo de su inyección al lazo cerrado pudiendo incluso cambiar durante el trayecto de una posición a otra.**

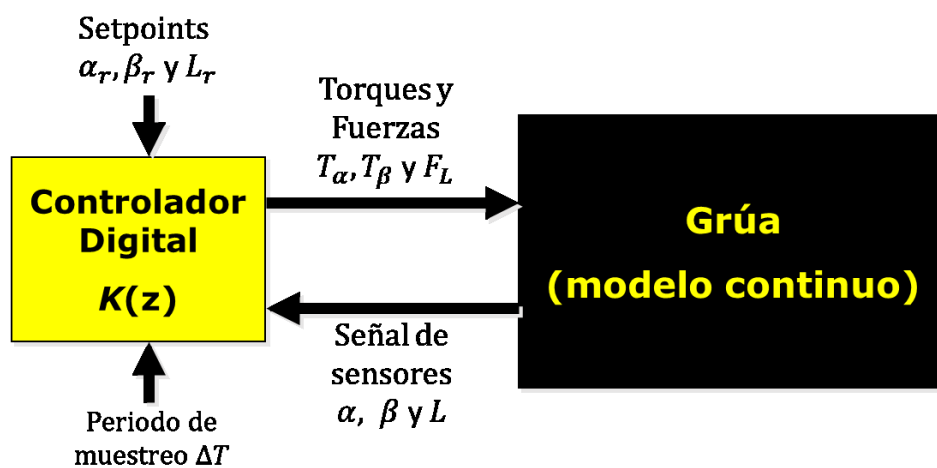


Figura 1. Diagrama en bloques del proceso a controlar. Caja negra: modelo entregado; Caja amarilla: Controlador a ser diseñado por el alumno en forma individual.

El periodo de trabajo del sistema será de  $\Delta T = 1$  segundo.

Los sensores entregan valores en radianes entre 0 y  $2\pi$  para azimuth y entre 0 y  $\pi/2$  para elevación. Estos valores se entregarán contaminados con ruido dentro del modelo el cual es agregado internamente en el modelo.

En el diseño del controlador, se deberá prestar especial importancia a no golpear los límites mecánicos de la grúa:

- En elevación, el límite mecánico inferior será  $-10^\circ$  y el superior  $+85^\circ$
- En azimuth no existirá límite mecánico, pudiendo girar en cualquier dirección en forma indefinida
- En el desplazamiento de la flecha, el límite mecánico inferior será 0 m (flecha completamente contraída) y +6 m (extensión máxima).

**El exceder estos límites implica que usted estaría dañando o al camión o a la estructura de la grúa, por lo que su desarrollo será inválido.**

En el controlador, se sugiere trabajar con errores de control ajustados para el rango circular  $[-\pi, \pi]$ .

El alumno es libre de usar el tipo de control que desee, pero se sugiere comenzar con un controlador convencional tipo PID, efectuando mejoras para esta aplicación particular, tales como:

- Control prealimentado
- Anti *wind-up*
- Filtro para reducir ruido de sensores
- Ganancias variables en el tiempo en función de valores medidos por los tres sensores

Los motores de elevación y azimut generan torques máximos de +/- 900.000 Nm y el motor de traslación de la flecha genera una fuerza máxima de +/- 30.000 N. Esto es restringido internamente en el modelo.

El modelo se entregará en lenguaje MATLAB. También se aceptarán desarrollos en *Python*. Los alumnos que opten por esta opción, deberán traducir el modelo desde MATLAB a *Python*.

### Evaluación de la calidad del control

Para evaluar el desempeño del controlador, se usará una funcional de costo que corresponderá a la sumatoria entre los tiempos de inicio y término de la prueba ( $T_{ini}$  y  $T_{fin}$ ) de 3 términos:

- los valores cuadráticos del error de control,
- de las variables manipuladas y
- de las derivadas temporales de la variable manipulada.

La minimización de esta función busca alcanzar un buen desempeño en exactitud y rapidez ( $e^2$ ) y suavidad en los movimientos  $(\Delta u)^2 [u: T \text{ o } F]$ . Matemáticamente en el dominio discreto:

$$J = \sum_{k=T_{ini}/\Delta T}^{T_{fin}/\Delta T} (e_{\alpha}^2(k) + e_{\beta}^2(k) + \rho_1 e_L^2(k) + \rho_2 \Delta T_{\alpha}(k)^2 + \rho_3 \Delta T_{\beta}(k)^2 + \rho_4 \Delta F_L(k)^2) ,$$

donde  $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$

Este índice rechazará soluciones que vulneren los límites mecánicos, es decir:

$$J = \infty \quad \text{si} \quad \begin{cases} \alpha < -10^\circ & \text{o} & \alpha > 85^\circ \\ L < 0m & \text{o} & L > 6m \end{cases} , \text{ para cualquier } k$$

Los valores de los coeficientes de peso anteriores son:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 0.02 \\ \rho_2 &= 0.2 \times 10^{-13} \\ \rho_3 &= 0.2 \times 10^{-13} \\ \rho_4 &= 0.2 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

Se valorará el obtener valores bajos para la funcional de costo y habrá un bono para aquellos alumnos que obtengan los mejores resultados (valores más bajos de  $J$ ). En el control del proceso, usted podrá usar cualquier tipo de controlador para lograr minimizar la funcional de costo.

### EJEMPLO

A continuación, se presenta un ejemplo para orientar el trabajo de los alumnos. Las figuras muestran la respuesta del sistema ante cambio simultáneos en los setpoints de elevación, azimut y desplazamiento de flecha.

El sistema es llevado a reposo en posición cero para las tres variables

Luego, al segundo 100, se le aplica **simultáneamente** un escalón a la referencia de las tres variables iguales a:

$$\begin{aligned} \alpha_{ref} &= 75^\circ \\ \beta_{ref} &= 185^\circ \end{aligned}$$

$$L_{ref} = 5 \text{ m}$$

Al segundo 200, se invierten los movimientos, llevando el sistema a su posición de reposo inicial, es decir:

$$\alpha_{ref} = 0^\circ$$

$$\beta_{ref} = 0^\circ$$

$$L_{ref} = 1 \text{ m}$$

Las siguientes figuras muestran las respuestas de cada variable:

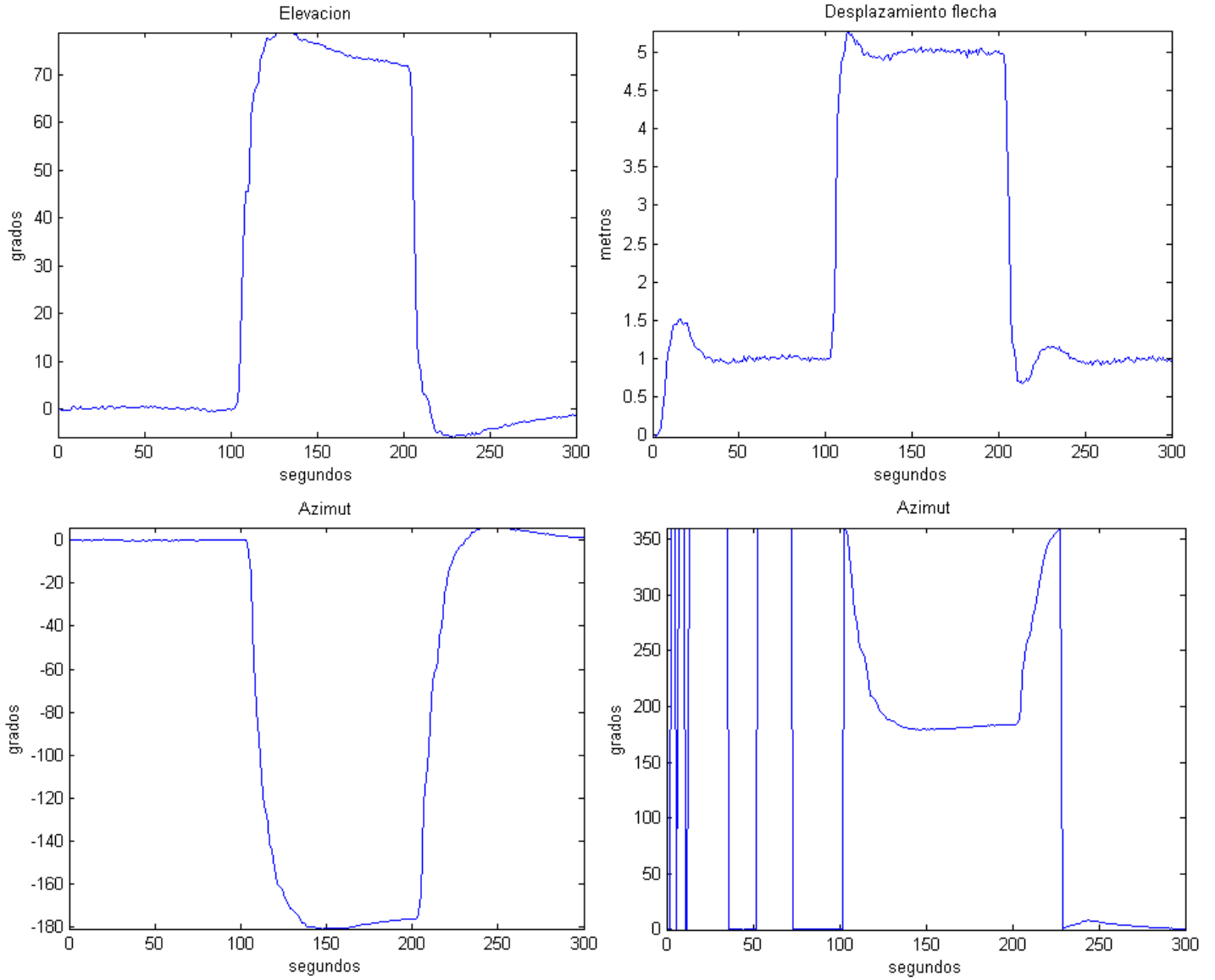


Figura 2. Respuestas del sistema ante cambios simultáneos en referencias: i) Elevación; ii) Flecha; iii) Azimut (rango circular  $[-\pi, \pi]$ ); Azimut (rango circular  $[0, 2\pi]$ ).

En este ejemplo el índice de desempeño es activado entre  $T_{ini} = 100s$  y  $T_{fin} = 300s$  alcanzando un valor de:

$$J = 80.2$$

## INFORME Y NOTA FINAL

Se espera que usted sea capaz de realizar un documento técnico que detalle el proceso que siguió para obtener el controlador final, así como la discusión de sus resultados.

**Si optó por un controlador no-convencional, por ejemplo distinto de un PID, explique las motivaciones para ello.**

Sea ordenado, comente el código y genere gráficos claros con toda la información necesaria en ellos para hacerlos comprensibles.

### Criterios de Evaluación

En la siguiente tabla se presentan los criterios y los porcentajes de evaluación con los que corregirá el informe.

Criterio	Porcentaje
Presentación y Originalidad	10%
Desarrollo de los modelos y controladores	30%
Análisis y supuestos	40%
Discusión de los resultados	20%

Le ponderación final del trabajo será de un 40% para la entrega 1 y un 60% de la entrega 2.

**También existirá una evaluación oral de los trabajos, que junto con las dos entregas anteriores determinarán la nota final.**

### Casos a simular en informe

Como resultados a incluir en el informe, se deberá incluir ejemplo de dos procedimientos de control:

1. Secuencial o desacoplado: Cambios a los *setpoints* en forma progresiva, por ejemplo. Llevar grúa al valor deseado en azimut, luego en elevación y finalmente en flecha.
2. Simultáneo o acoplado: Los cambios a los *setpoints* se aplican en forma simultánea a las tres variables, por lo que el resultado de la combinación de las 3 variables, la cual es altamente interactuante.
3. Para la evaluación de la calidad de la respuesta, es decir el valor de  $J$ , el controlador se someterá a la misma prueba del ejemplo, con exactamente los mismos intervalos de tiempo y con los siguientes valores de *setpoints*.

En  $t = 0s$ , el sistema es llevado a reposo en posición cero para las tres variables:

$$\begin{aligned}\alpha_{ref} &= 0^\circ \\ \beta_{ref} &= 0^\circ \\ L_{ref} &= 1\text{ m}\end{aligned}$$

Al segundo 100, se aplica **simultáneamente** un escalón a la referencia de las tres variables iguales a:

$$\begin{aligned}\alpha_{ref} &= 75^\circ \pm 5^\circ \\ \beta_{ref} &= 185^\circ \pm 10^\circ \\ L_{ref} &= 5 \pm 0.5\text{ m}\end{aligned}$$

Al segundo 200, se invierten los movimientos, llevando el sistema a su posición de reposo inicial, es decir:

$$\begin{aligned}\alpha_{ref} &= 0^\circ \pm 5^\circ \\ \beta_{ref} &= 0^\circ \pm 10^\circ \\ L_{ref} &= 1\text{ m} \pm 0.5\text{ m}\end{aligned}$$

La integral de  $J$  sólo estará activa entre los tiempos  $t = 100s$  y  $t = 300s$ .

**Para el informe**, deberán usar los valores nominales del ejemplo.

**Para la interrogación individual**, los cambios de referencia se definirán dentro de un rango.

Evidentemente el valor de  $J$  será distinto para cada valor dentro de ese rango y eso estará considerado en la evaluación individual. Sin embargo, el sistema se deberá comportar en forma satisfactoria para cualquier elección (por ejemplo, no se deberán golpear los límites).

### **Fecha entrega informe y programas**

La entrega de la segunda parte del proyecto será a más tardar el Jueves 2 de Julio hasta las 23:59. Recuerde que el cuestionario se cierra inexorablemente a esta hora. Si necesita subir más archivos anexos puede hacerlo agrupando sus archivos en un paquete comprimido (.rar, .zip, etc).

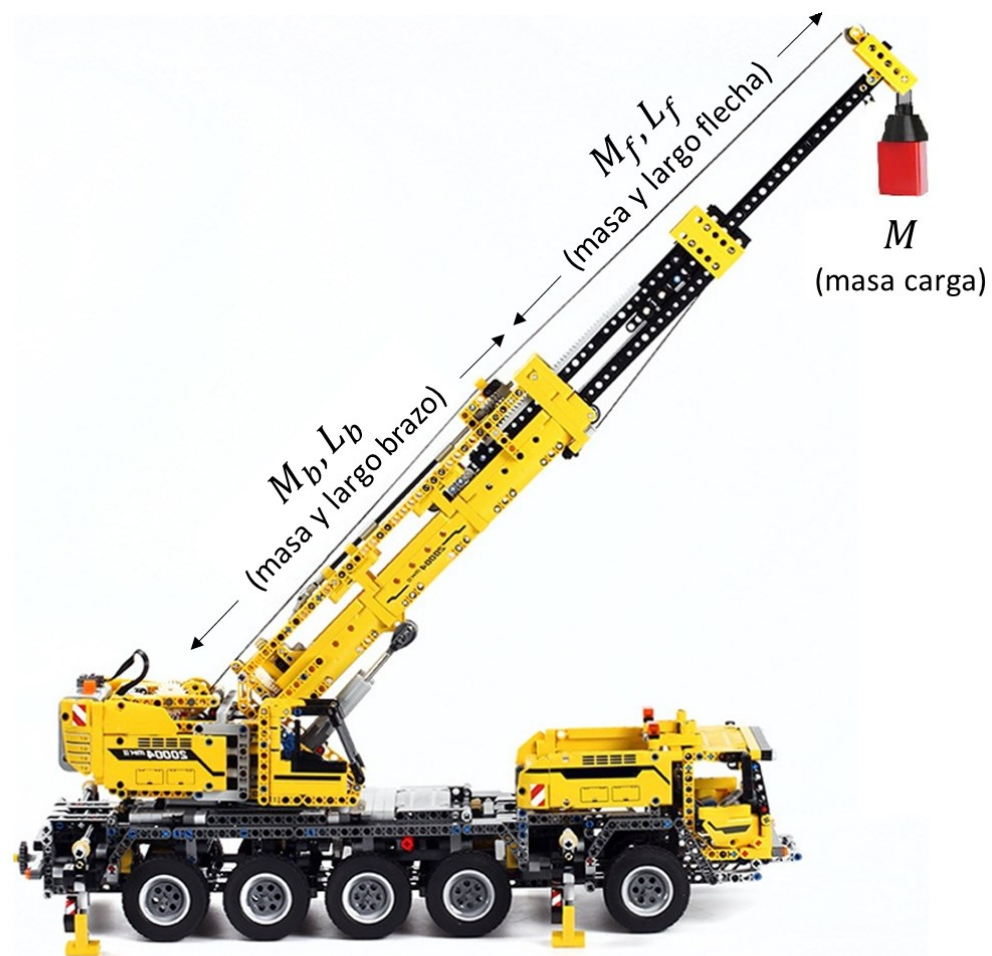
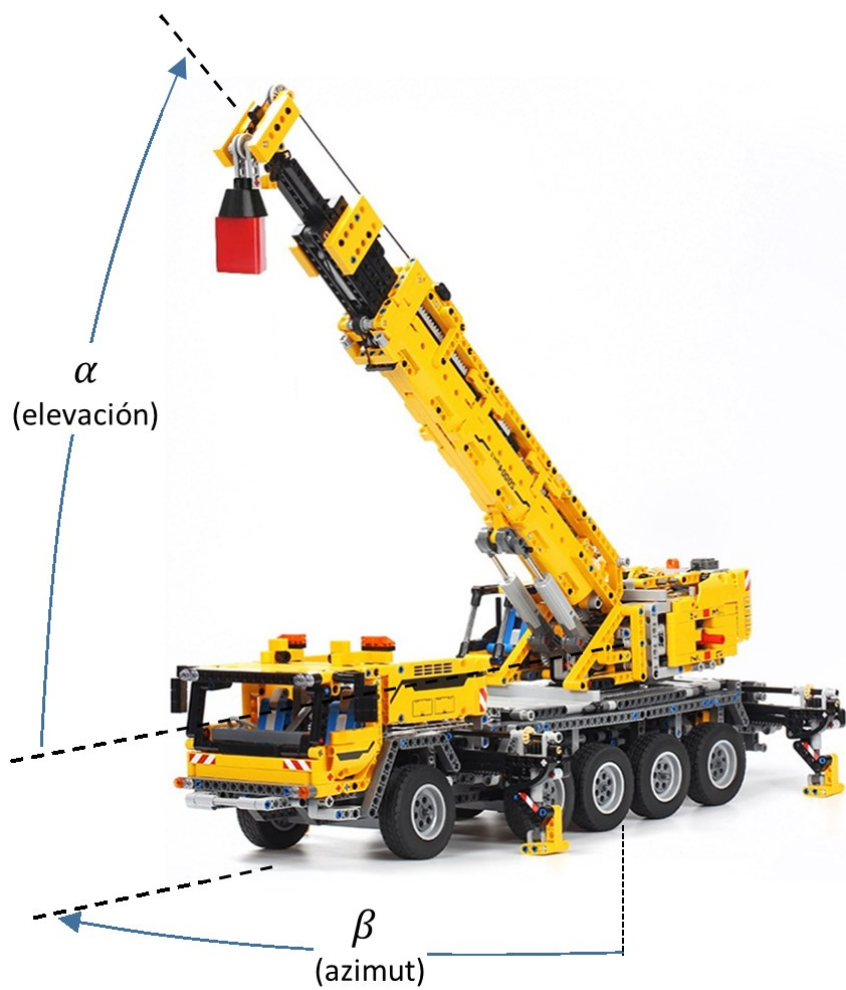


Figura 3: Grúa