

# Proyecto Global Integrador: Control Semi-Automático Coordinado de Grúa Portuaria de Muelle tipo Pórtico

## 1. Objetivo y Alcances

Proyecto didáctico con el objetivo de integrar los conocimientos y competencias de la asignatura en una aplicación concreta simplificada.

Desarrollo e implementación de un **autómata híbrido de control** para **operación semi-automática coordinada en una grúa portacontenedores portuaria de muelle tipo pórtico**. Incluye: diseño, implementación de modelo conceptual y análisis de desempeño mediante simulación “Model-in-the-Loop” (Simulink/Stateflow); e implementación en entorno de programación de autómatas industriales bajo norma IEC 61131 (CODESYS) y simulación “Software-in-the-Loop” (emulación o co-simulación).

## 2. Lineamientos

- Trabajo en grupo de dos (2) alumnos. Horario de Consulta semanal.
- **Presentación de Informe Técnico**, completo y breve, cumpliendo lo pedido a continuación e incluyendo: Resumen. Introducción. Desarrollo: modelado y esquemas conceptuales; análisis; diseño e implementación; simulación; resultados. Conclusiones. Referencias consultadas. (Ver documento complementario: Guía de Informe.)
- **Exposición presencial y demostración** breve mediante:
  - Simulación conceptual “Model-in-the-Loop” (Matlab/Simulink/Stateflow);
  - Implementación y simulación “Software-in-the-Loop” en entorno IEC 61131 (CODESYS): (emulación de planta en CODESYS o co-simulación CODESYS - Simulink).
- Plazo de presentación: Marzo-Abril de 2019 (fecha a coordinar).

## 3. Especificaciones de Control

### 3.1. Aplicación

Control de Operación Semi-Automática de una grúa portacontenedores portuaria de muelle tipo pórtico (**Figura 1** y esquema en **Figura 2**).

El **sistema físico** a controlar considera *dos movimientos principales* continuos en un plano vertical (2D): *traslación del carro (horizontal) e izaje de la carga (vertical)*, impulsados mediante motores eléctricos con sus correspondientes accionamientos electrónicos, con restricciones de recorrido (posiciones límite), velocidades y aceleraciones máximas. Ambos movimientos están *acoplados* entre sí por la carga (contenedor y gancho) que se balancea, suspendida del carro que la traslada mediante los cables de izaje.



**Figura 1: Grúa Portuaria de Muelle tipo Pórtico**

El **autómata híbrido de control** debe considerar dos niveles de control (más un nivel 0 de seguridad):

- 1) **Control supervisor global**, de *estados discretos activados por eventos*, con estructura jerárquica y/o concurrencia (comandos de operador, límites normales de operación: fines de carrera, velocidad, estado de carga), para *coordinación y optimización de trayectorias, control de operación global del sistema y diagnóstico (alarmas y fallas)*.
- 2) **Controladores de movimiento**, de *estados continuos en tiempo discretizado* ((control regulatorio de lazo cerrado), que reciben consignas de movimiento individuales del control supervisor para *control directo de cada uno de los movimientos principales* (izaje y traslación); están basados en accionamientos electro-mecánicos genéricos de 4 cuadrantes (control PID movim. con modulador de torque). Debe incorporarse el **control automático de balanceo** de la carga (ver Sección 3.2).

El **sistema de seguridad o protección (nivel 0)** debe estar *separado del nivel 1*; consiste en un autómata más reducido y confiable, que debe tomar el control ante falla crítica de niveles inferiores y/o riesgo de seguridad, contemplando: pulsadores de emergencia, actuación de límites de carrera últimos, sensor de sobrevelocidad de izaje y fallas de control / watchdog timer del autómata híbrido de control.

### 3.2. Control automático de ángulo de balanceo de la carga

El controlador de movimiento de traslación de carro debe incorporar la función adicional de *control automático realimentado (lazo cerrado) de balanceo de la carga* en el plano vertical durante la operación, a fin de amortiguar la oscilación durante la trayectoria y remanente una vez detenido el carro en posición final. Para ello, la máquina cuenta con un *sensor de ángulo* instantáneo entre la carga y el carro, con respecto a la vertical (ej. emisor infrarrojo en spreader y detector en carro: cámara CCD infrarroja con procesador de ángulo). La compensación del error de ángulo a implementar debe ser del tipo PD/PID con ganancias programadas o ajustadas (gain scheduling) en función de la altura de izaje i.e. longitud del péndulo equivalente, a partir de modelo LPV del sistema físico no lineal; este compensador de error de ángulo debe operar en paralelo con el controlador de movimiento del carro.

Las especificaciones de desempeño son: ángulo máximo durante aceleración/desaceleración =  $\pm 20^\circ$ ; ángulo máximo durante trayectoria =  $\pm 5^\circ$ ; ángulo residual al completar movimiento y detener carro =  $\pm 1^\circ$ .

Nota: El control de ángulo debe poder desactivarse o activarse a fin de evaluar comparativamente el desempeño del sistema semi-automático en ambos casos.

### 3.3. Ciclo de Operación Semi-Automática

La **operación semi-automática** (no totalmente automática) implica alternadamente dos modos principales diferenciados:

1. **Modo Manual**, con comando a cargo del operador, para maniobras de aproximación sobre barco o muelle, toma/liberación de carga e inicio de trayectoria (con monitoreo y límites de protección automáticos); y
2. **Modo Automático**, a cargo totalmente del sistema de control, para maniobras principales de izaje y traslación coordinada entre barco y muelle.

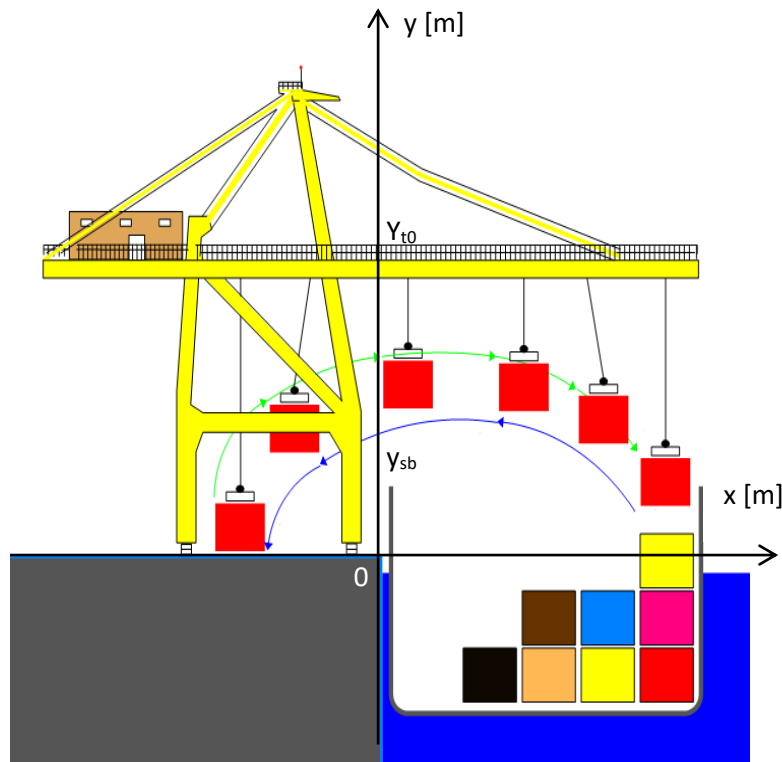


Figura 2: Esquema general de la Operación Semi-Automática de la grúa de muelle

Consta de una etapa inicial de configuración manual (descargado) y posteriormente la operación semi-automática propiamente dicha (ciclos repetitivos de operación, para carga y/o descarga):

- a) **Configuración (o aprendizaje)**: el operador ajusta, mediante interfaz hombre-máquina (HMI),
  - límites de traslación: sobre muelle, carril/es fijo/s (carga o descarga); y sobre barco, posición objetivo fija [0] o incremental [+/-1] (el operador puede luego alterar en modo manual la posición de re-inicio del modo automático);
  - altura de izaje máxima (despeje de obstáculos: viga testera, contenedores apilados iniciales vs. límite sup.), altura inicial de izaje y final de descenso automático (sobre muelle y sobre barco).
- b) **Ciclos de Operación** propiamente dichos:
  - **Ciclo Simple (carga ó descarga)**: el operador realiza, en **Modo Manual**, la maniobra inicial de aproximación, toma de carga (lado muelle o lado barco) e izaje inicial cargado → transferencia “en movimiento” a **Modo Automático**: Trayectoria de izaje, traslación (hacia lado opuesto), descenso y detención (o transferencia “en movimiento”) → **Modo Manual**: maniobra final de aproximación, liberación de carga e izaje inicial vacío → retorno **automático** vacío → Repetir ciclo.

Este ciclo de operación repetitivo simple puede ser: a) de **carga** ( $\rightarrow$  cargado hacia barco;  $\leftarrow$  vacío hacia muelle); b) de **descarga** ( $\rightarrow$  vacío hacia barco;  $\leftarrow$  cargado hacia muelle).

- **Ciclo doble (carga y descarga):** Como alternativa al ciclo de operación simple (carga ó descarga), el autómata de control debe permitir flexibilidad durante el **Modo Manual** del ciclo, para realizar a elección (según comando de operador) ciclos de carga y descarga simultáneos ( $\rightarrow$  cargado hacia barco;  $\leftarrow$  cargado hacia muelle, desde dos posiciones de barco variables hacia dos carriles distintos fijos lado muelle).

La **determinación de** si el gancho extensible o “spreader” está **cargado o vacío** depende de su situación física: trabas (“twistlocks”) cerrados (cargado) o abiertos (vacío); dicha operación de cierre/apertura es permitida sólo con el spreader apoyado completamente sobre un container (4 sensores).

La condición de cargado o vacío del spreader debe tenerse en cuenta para definir la **velocidad máxima de izaje (operación a potencia constante)** para aprovechar potencia instalada en motores y reducir tiempo de ciclo). Al optimizar el movimiento, para permitir *operación simultánea de izaje y traslación* (a fin de disminuir el tiempo de ciclo y aumentar la productividad), la condición de cargado o vacío también debe considerarse para calcular el despeje óptimo de altura de obstáculos.

Por razones de seguridad y de continuidad/optimización de movimientos, la **transferencia entre modo manual y modo automático** debe ser en movimiento *sin detención*, suave o sin golpe (**Manual/Auto “bumpless transfer”**): **Manual $\rightarrow$ Auto**: sin detención, a partir de “estado” de movimiento “inicial” llevar a estado deseado con rampa sin desacelerar ni detener; **Auto $\rightarrow$ Manual**: si no se demanda movimiento manual, detener y esperar; pero si, mientras está en automático, en cualquier momento el operador demanda movimiento manual activando cualquiera de las palancas de aceleración (carro o izaje), el control automático debe realizar transición en rampa con tiempo o aceleración limitada desde “estado” de movimiento “inicial” hasta estado de movimiento demandado por operador.

El modo automático debe **optimizar los tiempos de ciclo de operación**, es decir, para cada trayectoria específica buscar el menor tiempo posible de ejecución automática (implica **movimientos simultáneos**: iniciar traslación de carro lo antes posible mientras se está izando, y el descenso lo antes posible mientras se está trasladando), pero **evitando** cualquier posible **colisión** con obstáculos fijos o variables según la carga del barco. Elegir **parámetros adecuados de control y coordinación de trayectorias** para obtener balanceo dentro de especificaciones y sin colisiones, junto con la función específica de control automático realimentado de balanceo.

## 4. Datos del Sistema Físico a controlar

### 4.1. Hipótesis simplificadoras

- Estructura de pórtico totalmente rígida.
- Sistema de izaje de carga (motor, tambor y cable) totalmente sobre el carro (“Machinery on Trolley”); 1 cable equivalente elástico sin masa propia.
- Carro soportado por la estructura; desplazamiento horizontal (tracción) sin resbalamiento.
- Efectos externos: resistencia aerodinámica al viento despreciable de la carga y carro; sólo se considera aceleración gravitatoria vertical sobre la carga.

### 4.2. Coordenadas y Límites de movimiento (posición, velocidad, aceleración)

(Sistema de referencia inercial fijo a muelle, ver **Figura 2**)

#### 1. Traslación de carro: eje x, horizontal (positivo $\rightarrow$ referido al borde de muelle $x=0$ )

- Posición x: [-30.0 (sobre muelle) ... 0.0 ...(sobre barco) +50.0] m;

- Velocidad máx.: +/- 4.0 m/s (cargado o sin carga);
- Aceleración máx: +/- 1.0 m/s<sup>2</sup> (cargado o sin carga).

2. **Izaje de carga:** eje y, vertical (positivo ↑ referido al nivel de muelle y=0)

- Posición y: [-20.0 (dentro de barco) ... 0.0 ...(sobre barco / muelle) +40.0] m;  
Altura (fija) de Carro y Sistema de izaje:  $Y_{t0}=+45\text{m}$   
Despeje mínimo sobre borde de muelle (viga testera o “sill beam”):  $Y_{sb}=+15\text{m}$
- Velocidad máx.: +/- 1.5 m/s (cargado con carga nominal); +/- 3.0 m/s (sin carga)

Nota: Operación con “**potencia constante**” dependiendo de la carga total en cada movimiento, para máximo aprovechamiento de la capacidad de izaje y reducción de tiempo de ciclo;

- Aceleración máx.: +/- 1.0 m/s<sup>2</sup> (cargado o sin carga).

### 4.3. Carga suspendida

(Carga sometida a acción externa: aceleración gravitatoria  $g=9.80665\text{ m/s}^2$ )

- a) Gancho vacío:  $m_l=m_{l0}=15000\text{ kg}$  (sin carga, altura 0.0 bajo gancho)
- b) Gancho con carga: (cargado: contenedor, altura 2.5m bajo gancho)
  - nominal:  $m_l=65000\text{ kg}$  (15000 kg + 50000 kg)
  - mínima (contenedor vacío = 2000 kg)  $m_l=17000\text{ kg}$  (15000 kg + 2000 kg)
  - intermedia (contenedor cargado con carga menor que nominal)

### 4.4. Cadena cinemática de accionamientos

(Modelos simplificados c/modulador de torque idealizado [en DT continuo]:  $G_T(s) = \frac{T_m(s)}{T_m^*(s)} = \frac{1}{\tau.s+1}$ )

1. **Traslación de carro:** → referir a coordenada de traslación x

- Carro (incluye sistema izaje):  $m_c=50000\text{ kg}$ ;
- Radio primitivo de rueda:  $R_w = 0.5\text{ m}$ ;
- Momento de inercia de ruedas (eje lento):  $J_w = 2.0\text{ kg.m}^2$ ;
- Caja reductora: relación  $i=15.0:1$ ;
- Momento de inercia de motor y freno (eje rápido):  $J_m = 10.0\text{ kg.m}^2$ ;
- Fricción mecánica:  $b_{eq}=30\text{ Nm/(rad/s)}$ , en eje rápido → definir  $b_m, b_w$
- Torque máximo de motor: calcular a partir de aceleración máxima desacoplado (dimensionamiento) → saturar consigna  $T_m^*(t)$  en controlador (protección).

2. **Izaje de carga:** → referir a coordenada de izaje y

- Hipótesis simplificativa: cable elástico a la tracción, pero siempre tensado por acción de gravedad (sin flexión o pandeo) y sin masa propia; rigidez a tracción:  $K_w = 1800\text{ kN/m}$ ; amortiguamiento propio:  $b_w = 30\text{ kN/(m/s)}$ .
- Radio primitivo de tambor:  $R_d = 0.75\text{ m}$  (1 sola corrida de cable);
- Momento de inercia de tambor (eje lento):  $J_d = 8.0\text{ kg.m}^2$ ;
- Caja reductora: relación  $i=30.0:1$ ;

- Momento de inercia de motor y freno (eje rápido):  $J_m = 30.0 \text{ kg.m}^2$ ;
- Fricción mecánica: ( $b_{eq}=18\text{Nm}/(\text{rad/s})$ , en eje rápido  $\rightarrow$  definir  $b_m$ ,  $b_d$ ).
- Torque máximo de motor: calcular a partir de aceleración máxima desacoplado (dimensionamiento)  $\rightarrow$  saturar consigna  $T_m^*(t)$  en controlador (protección).

#### 4.5. Modelo dinámico simplificado (NL) del sistema carro-izaje-carga (en tiempo continuo)

(Modelo equivalente, referido a coordenadas en plano vertical de traslación x e izaje y)

Carga suspendida:  $m_l \ddot{x}_l(t) = -F_w(t) \cdot \sin \theta(t)$  (Ec. 1.a)

$m_l \ddot{y}_l(t) = F_w(t) \cdot \cos \theta(t) - m_l \cdot g$  (Ec. 1.b)

Carro y Accionamiento Traslación:  $M_t \ddot{x}_t(t) = F_t(t) - b_t \cdot \dot{x}_t(t) + F_w(t) \cdot \sin \theta(t)$  (Ec. 2)

Accionamiento Izaje:  $M_h \ddot{l}_h(t) = -F_h(t) - b_h \cdot \dot{l}_h(t) + F_w(t)$  (Ec. 3)

Cable elástico amortiguado:  $F_w(t) = K_w \cdot (l(t) - l_h(t)) + b_w \cdot (\dot{l}(t) - \dot{l}_h(t))$  (Ec. 4)

Nota: cable siempre tensado por acción de gravedad, sin flexión o pandeo:  $l(t) \geq l_h(t)$

Restricción geométrica:

$$x_l(t) = x_t(t) + l(t) \cdot \sin \theta(t)$$

$$y_l(t) = y_{t0} - l(t) \cdot \cos \theta(t)$$

o, equivalentemente:

$$l(t) = \sqrt{(x_l(t) - x_t(t))^2 + (y_{t0} - y_l(t))^2}$$

$$\tan \theta(t) = \frac{x_l(t) - x_t(t)}{y_{t0} - y_l(t)} \text{ (Usar función atan2 [4 cuadrantes])}$$

Restricción de ángulo:  $-\frac{\pi}{2} < \theta(t) < \frac{\pi}{2}$  (en la práctica, ángulo bastante menor)

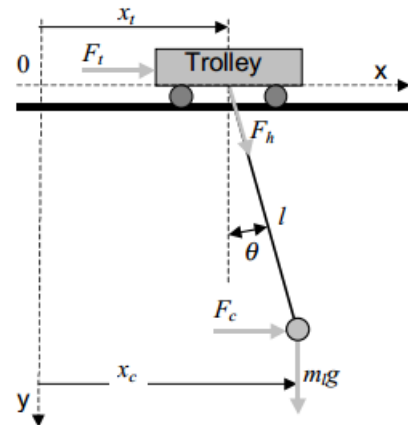


Figura 3: Modelo físico idealizado (ver Nota)

Nota: utilizar la nomenclatura y sentido de eje y indicados en la descripción de coordenadas y ecuaciones, la cual difiere levemente de la indicada en el modelo físico idealizado de la Fig. 2.

#### 4.6. Condiciones o Estado Inicial:

- Estado inicial consistente, para simulación: definir estado inicial del sistema físico consistente y realista (ej. equilibrio cargado con spreader vacío en posición inicial sobre muelle, acorde con situación inicial del autómata híbrido de control).