

Control Híbrido de Accionamiento de Izaje

1. Aplicación: Grúa Portuaria



Figura 1: Grúa Portacontenedores Portuaria de Muelle tipo Pórtico (Vista Lateral)

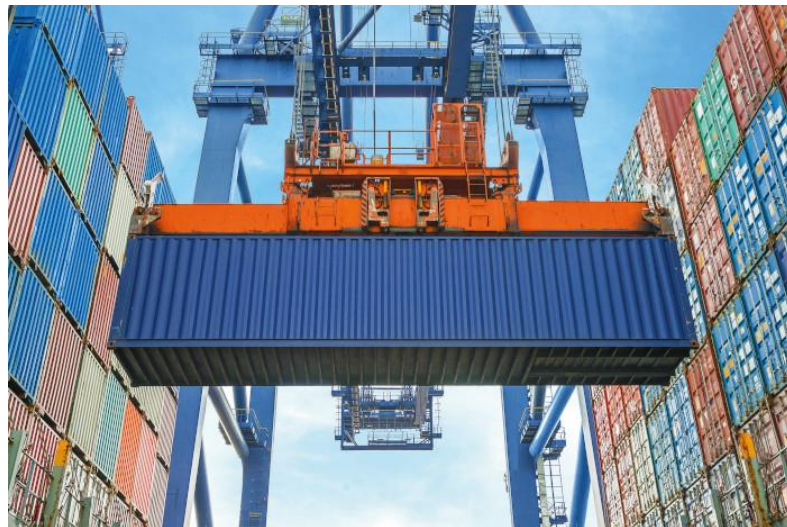


Figura 2: Grúa Portacontenedores Portuaria de Muelle tipo Pórtico (Vista desde Barco)

2. Modelo del sistema físico

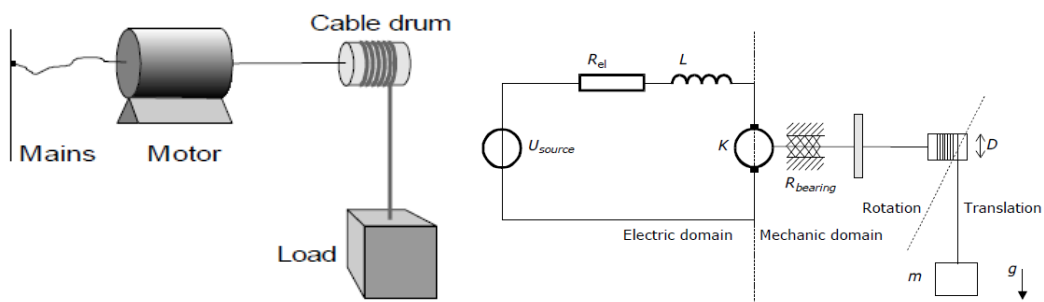


Figura 3: Modelo físico Idealizado del Sistema de Accionamiento de Izaje

Modelo dinámico en tiempo continuo, simplificado, del sistema carro-izaje-carga (con y sin apoyo o contacto vertical)

Modelo equivalente en coordenadas cartesianas globales de plano vertical: traslación x e izaje y, ver **Figura 4**. Perfil de obstáculos o apoyo vertical $y_{c0}(x, t)$ para cada posición x, actualizar en función de t (al modificarse durante las maniobras de carga o descarga).

Carga suspendida [$y_l(t) > y_{c0}(x, t)$]:

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

Carga apoyada [$y_l(t) \leq y_{c0}(x, t)$]:

$$m_l \cdot \ddot{y}_l(t) = F_w(t) - m_l \cdot g + K_{cy} \cdot (y_{c0}(x, t) - y_l(t)) - b_{cy} \cdot \dot{y}_l(t) \quad (\text{Ec. 1.b'})$$

Cable elástico amortiguado, *tensado* por acción de gravedad sobre carga suspendida, sin flexión o pandeo: $l(t) \geq l_h(t)$:

$$F_w(t) = K_w \cdot (l(t) - l_h(t)) + b_w \cdot (\dot{l}(t) - \dot{l}_h(t)) \quad (\text{Ec. 2})$$

Cable elástico amortiguado, “flojo” al apoyar carga, con flexión o pandeo: $l(t) < l_h(t)$

$$F_w(t) = 0 \cdot (l(t) - l_h(t)) + 0 \cdot (\dot{l}(t) - \dot{l}_h(t)) = 0 \quad (\text{Ec. 2'})$$

Accionamiento Izaje: $M_h \cdot \ddot{l}_h(t) = -F_{hm}(t) + F_{hb}(t) - b_h \cdot \dot{l}_h(t) + F_w(t) \quad (\text{Ec. 4})$

Modelo lógico (on-off) y físico (fricción mecánica con saturación) de operación de Frenos mecánicos disipativos de parking (Normal Cerrado cuando desenergizado)

Freno *energizado = abierto*: $F_{hb}(t) = 0$;

Freno *desenergizado = cerrado*: $F_{hb}(t) = -b_{hb} \cdot \dot{l}_h(t) \wedge -F_{hb \text{ Max}} < F_{hb}(t) < +F_{hb \text{ Max}}$

Parámetros: $b_{tb} \gg F_{tb \text{ Max}}$

Restricción geométrica entre sistema de izaje, cable tensado y carga (Ecuaciones algebraicas adicionales):

$$y_l(t) = y_{t0} - l(t) \quad (\text{Ec. 5.b})$$

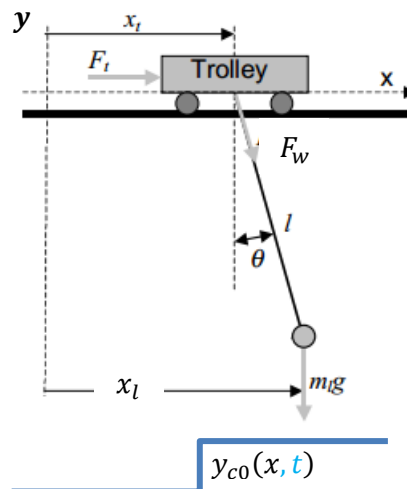


Figura 4: Modelo físico idealizado (ver Nota)

Nota: considerar sentido de eje y positivo ↑ con origen 0 a nivel de muelle (ver **Figura 2**), como se indica en la descripción de coordenadas y ecuaciones (leve diferencia con modelo idealizado **Figura 4**).

Cadena cinemática de accionamiento

- Considerar modelo de control de movimiento de accionamiento en cascada con *modulador de torque idealizado* equivalente [en DT continuo]: $G_T(s) = \frac{T_m(s)}{T_m^*(s)} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1}$, $\tau = 1\text{ms}$.
 - Torque máximo de motor izaje: calcular a partir de aceleración máxima desacoplado (dimensionamiento) \rightarrow saturar consigna $T_m^*(t)$ en controlador (protección).
2. **Izaje de carga:** \rightarrow referir a coordenada de izaje y.
- **Cable de acero (wire rope)** de izaje “equivalente” (8 cables): masa propia despreciable (simplificación); modelo elástico amortiguado trabajando a *tracción* (caso general, siempre tensado por acción de aceleración gravitatoria cuando el cabezal y/o carga están suspendidas, sin flexión o pandeo); NO soporta *compresión* (caso particular cuando el cabezal y/o carga están apoyados y el cable “se afloja”), en tal caso el cable se flexiona o padea \rightarrow rigidez a tracción: $K_w = 1800\text{ kN/m}$; amortiguamiento (fricción interna): $b_w = 30\text{ kN/(m/s)}$.
 - Radio primitivo de tambor: $R_d = 0.75\text{ m}$ (enrollado helicoidal, 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: ($b_{eq}=18\text{Nm/(rad/s)}$), en eje rápido \rightarrow definir b_m, b_d .

Coordenadas y Límites de movimiento (posición, velocidad, aceleración)

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

1. **Izaje de carga:** eje y, vertical (positivo \uparrow 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.: $\pm 1.5\text{ m/s}$ (cargado con carga nominal); $\pm 3.0\text{ m/s}$ (sin carga)
Nota: Operación a “**potencia constante**” (ver **Figura 5**) dependiendo de la carga total en cada movimiento, máximo aprovechamiento de capacidad de izaje y reducción de tiempo de ciclo;
 - Aceleración máx.: $\pm 1.0\text{ m/s}^2$ (cargado o sin carga).

Carga suspendida

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

- Spreaders vacío: $m_i = m_{i0} = 15000\text{ kg}$ (sin carga, altura 0.0 bajo spreader)
- Spreaders con carga: (cargado: contenedor, altura 2.5m bajo spreader)
 - nominal: $m_i = 65000\text{ kg}$ (15000 kg + 50000 kg)
 - mínima (contenedor vacío = 2000 kg) $m_i = 17000\text{ kg}$ (15000 kg + 2000 kg)
 - intermedia (contenedor cargado con carga menor que nominal y mayor que mínima)

Carga **apoyada**, parámetros de **contacto (carga-apoyo)**:

- Rigidez y fricción vertical (**compresión**): $K_{cy} = 1.3 \times 10^6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$; $b_{cy} = 10000 \frac{\text{kN}}{\text{m/s}}$

3. Especificaciones del Sistema de Control y Protección

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

El **sistema físico** a controlar considera inicialmente en forma simplificada *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 (cabezal/spreader y contenedor) que se balancea, suspendida del carro que la traslada mediante los cables de izaje.

El **autómata híbrido de control y protección** debe considerar dos niveles de control, más un nivel 0 de seguridad o protección (separado):

- 1) **Control supervisor global**, de *estados discretos activados por eventos* (autómata secuencial), con estructura jerárquica y/o concurrencia (comandos de operador, límites normales de operación: fines de carrera, velocidad, estado de carga, detección de cable de izaje "flojo" al apoyar o tomar el contenedor, operación de frenos mecánicos al detener o iniciar los movimientos), para operación suave y eficiente con *coordinación y optimización de trayectorias, control de operación global del sistema y diagnóstico: Alarmas (ej. sobrecarga de izaje, sobretemperatura en motores, etc.) y Fallas/fallos (ej. sobrevelocidad, sobrepaso de límites de operación, no seguimiento de consignas, etc.)*.
- 2) **Controlador 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** ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

La función de **Seguridad o Protección (nivel 0)** debe estar *separada 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. Este autómata debe estar **jerarquizado**, con selectividad según el origen y criticidad de la falla: emergencia total, ó emergencia de carro solamente, ó emergencia de izaje solamente.

La **determinación de** si el cabezal 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). También se dispone del sensado de peso de carga como señal redundante cuando el cabezal está suspendido.

La condición de cargado o vacío del spreader, y el peso total suspendido, deben tenerse en cuenta para definir la **velocidad máxima de izaje (operación a Potencia Constante** en función de la carga, para aprovechar la potencia instalada en motores y reducir tiempo de ciclo con cargas menores a la nominal, hipérbola en **Figura 3**).

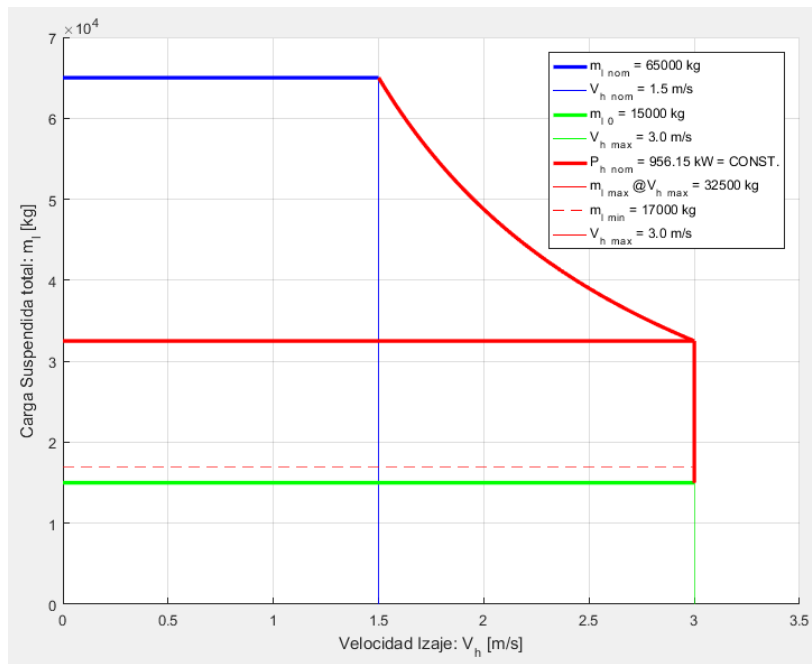


Figura 5: Característica de Potencia Constante - Carga suspendida vs. velocidad izaje