

Proyecto Global Integrador: Guía de Trabajo

Control de Accionamientos y Automatización de Grúa Portacontenedores de Muelle tipo Pórtico

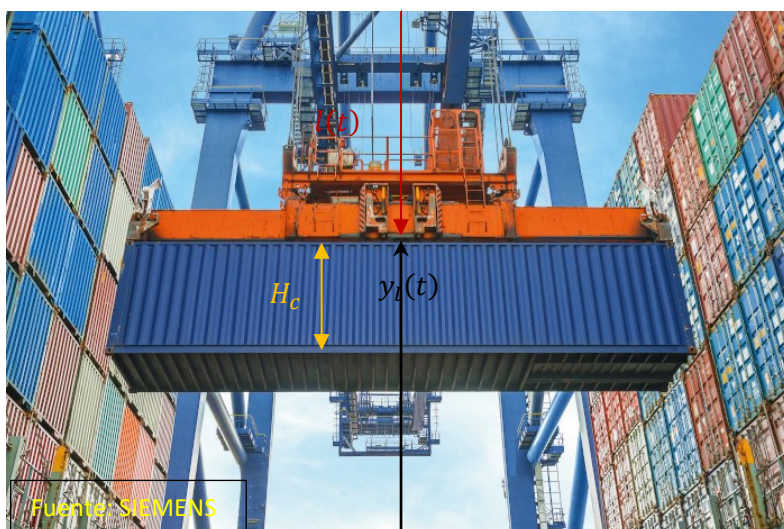
1. Objetivo y Alcances

Proyecto didáctico, con el objetivo de integrar los conocimientos y competencias fundamentales del Espacio Curricular “**Autómatas y Control Discreto**” en una aplicación mecatrónica real, a partir de *Especificaciones de Requisitos* simplificadas.

Desarrollo e implementación de un *Sistema Híbrido de Control y Protección con Operación Semi-Automática coordinada* para una Grúa Portacontenedores Portuaria de Muelle tipo Pórtico, para carga y descarga de contenedores (containers) en grandes barcos de transporte marítimo (**Figura 1**).



a) Vista lateral (*coordenadas globales x : traslación de carro – y : altura de izaje de la carga*).



b) Vista frontal, desde un barco, con detalle de *headblock/spreader* y carga suspendida: *container* (indicando altura de izaje $y_l(t)$ a base de spreader; y , si hay carga, alto de container H_c a descontar).

Figura 1: Grúa Portacontenedores Portuaria de Muelle tipo Pórtico (Ship-to-Shore Container Crane).

El *Sistema Híbrido de Control y Protección* debe incluir 3 niveles jerárquicos (jerarquía creciente):

- **Nivel 2 – Control Regulatorio:** estados continuos, muestreados en tiempo discretizado (Sampled CTDS).
- **Nivel 1 – Control Supervisor:** autómata, estados discretos activados por eventos (DEDS).
- **Nivel 0 – Protección:** en espera; actúa en situación de emergencia, lleva el sistema a estado seguro.

Este Proyecto debe realizarse en 2 etapas de desarrollo basado en modelos (Model-based Design):

- A) **Diseño, modelado conceptual y análisis de desempeño** mediante *simulación “Model-in-the-Loop”* (Stateflow [Niveles 0 y 1: estados discretos activados por eventos] – Simulink [Nivel 2: estados continuos en tiempo discretizado; y Planta: estados continuos en tiempo continuo]).
- B) **Implementación** del Sistema Híbrido de Control y Protección en entorno de desarrollo y programación para Controladores Digitales Programables industriales según norma IEC 61131 (CODESYS) y *co-simulación “Software-in-the-Loop”* (CODESYS [Niveles 0 y 1: SFC/ST] – Simulink [Nivel 2: Matlab function simil ST en tiempo discreto; Planta como diagrama de bloques continuos], comunicados mediante servidor/clientes según estándar OPC UA [OPC Unified Architecture]).

Nota: La implementación en CODESYS de los Niveles 0: Seguridad y 1: Control Supervisor, debe realizarse con *dos métodos alternativos* a **comparar** entre sí en cuanto a estructura, legibilidad y desempeño:

1. Programación inicial: **Codificación Manual** en lenguaje **SFC** (Sequential Function Charts) de la estructura completa de control supervisor y protección de estados discretos activados por eventos (“traducción” y adaptación manual de Statecharts originales de Stateflow a **SFC**, con funciones complementarias y cálculos en lenguaje **ST**, Structured Text);
2. Programación automática: **Generación de código automático** desde Simulink/Stateflow a CODESYS, completamente en lenguaje **ST** (Structured Text) utilizando el toolbox de Simulink **PLC Coder**, a partir de los Statecharts originales de Stateflow. Probar, verificar y analizar el código ST generado, comparando con la programación manual en SFC en cuanto a estructura, legibilidad y desempeño.

2. Lineamientos generales

- Trabajo colaborativo en **equipo** de dos (2) alumnos; ambos deben dominar todo el proyecto.
- El **contenido del trabajo** debe ser *producción propia original* basada en la revisión e integración de los conocimientos y competencias adquiridos (no debe ser copia adaptada, total o parcial, de ningún otro trabajo); y *cumplir con todos los requisitos y especificaciones pedidos en esta Guía de Trabajo*.
- **Horario de Consulta** semanal en días y horarios habituales durante el ciclo académico, con suficiente anticipación, para *consultar todas las dudas y mostrar avances* del trabajo.
- **Presentación de Informe Técnico**, completo y breve, cumpliendo todo lo pedido en esta Guía de Trabajo e incluyendo: Resumen. Introducción. Desarrollo: modelado y esquemas conceptuales; análisis; diseño e implementación; simulación; resultados. Conclusiones. Referencias. Anexos.

(Ver documentos complementarios de referencia: Guía para preparar Informe Técnico y Plantilla.)

- **Exposición presencial y demostración** mediante:
 - **Coloquio** basado en el Proyecto (con anterioridad, al menos una semana antes del Examen).
 - Presentación en **Mesa de Examen Final**, Ordinaria o Especial (ver Calendario Académico).
 - Plazo de presentación final: Hasta **Junio de 2026** (fecha a coordinar).
- Nota: para fechas posteriores, utilizar última versión vigente de esta Guía de Trabajo.

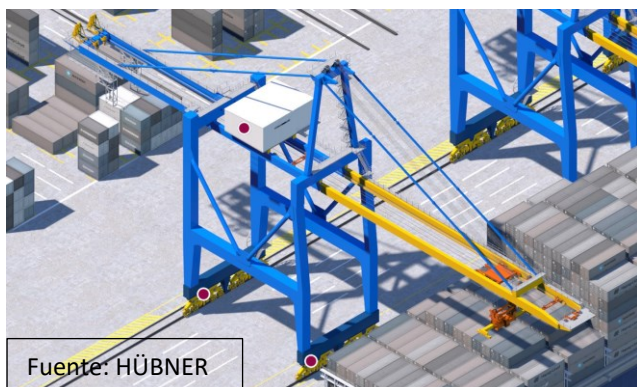
3. Especificaciones del Sistema Físico a controlar y su modelado

3.1. Aplicación

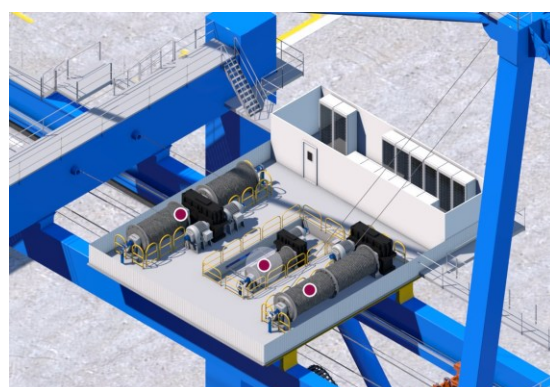
El sistema físico a controlar y automatizar es una *Grúa Portacontenedores Portuaria de Muelle tipo Pórtico* (STS: *Ship-to-Shore Container Gantry Crane*, **Figura 1**).

Este proyecto considera el control de accionamientos eléctricos y *operación semi-automática coordinada* de los dos movimientos principales continuos y simultáneos de la grúa en un plano vertical (2D): *traslación horizontal del carro (Trolley)* sobre las vigas principal y móvil (paralelo al eje x); e *Izaje/descenso, o traslación vertical, de la carga (Hoist)* bajo la posición del carro (paralelo al eje y). Ver **Figura 1.a**.

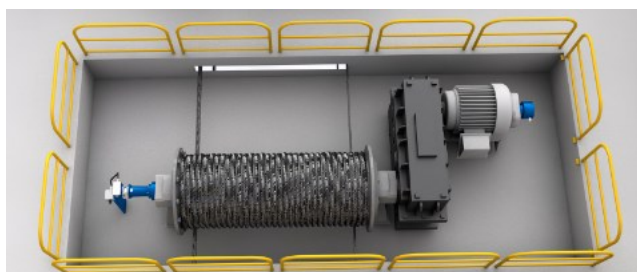
Ambos movimientos son impulsados mediante cables de acero (wireropes) desde mecanismos rotativos con tambores, cajas de engranajes, frenos mecánicos y motores eléctricos, ubicados en una Casa de Máquinas (Machinery House) fija (**Figura 2**), con sus correspondientes accionamientos electrónicos de velocidad variable; dichos movimientos tienen *restricciones* de operación: posiciones límite de recorrido, velocidades máximas y aceleraciones máximas. Están *acoplados entre sí por la carga* (headblock/spreader con o sin container, **Figura 1.b**), que se balancea suspendida del carro que la traslada mediante los cables de izaje.



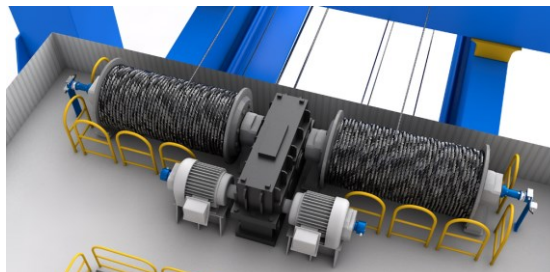
a) Ubicación de la Casa de Máquinas en la estructura



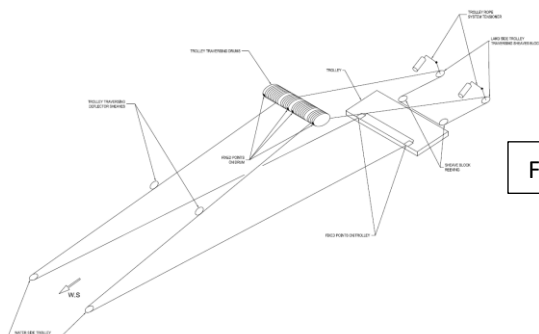
b) Casa de Máquinas y mecanismos principales



c) Mecanismo de accionamiento de Carro (Trolley Mechanical Drive)

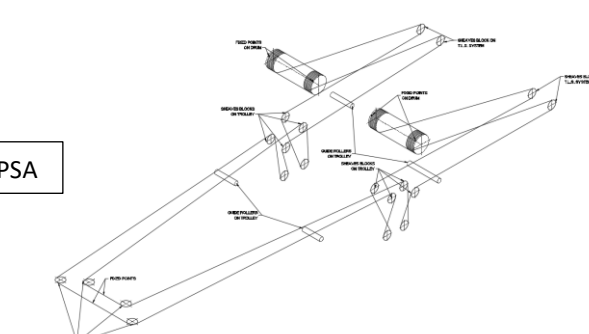


d) Mecanismo de accionamiento de Izaje (Hoist Mechanical Drive)



e) Despliegue (reeving) cerrado de 2 Cables de Carro

Fuente: IMPSA



f) Despliegue (reeving) abierto de 4 Cables de Izaje

Figura 2: Esquemas de Casa de Máquinas, mecanismos y cableado (rope reeving) de Carro e Izaje.

3.2. Configuración e Hipótesis simplificativas

- *Estructura* esbelta y algo flexible de vigas principal y móvil (main and boom girders) y del pórtico con ruedas sobre rieles de muelle. Pero se asume estructura *totalmente rígida*, sin deformación ni vibración.
- *Carro* soportado por la estructura rígida, con desplazamiento solo horizontal con 4 ruedas libres (no accionadas) sobre rieles en las vigas principal y móvil; el carro es accionado o tirado por cables (rope-towed trolley) desde el mecanismo de carro (tambor, reductor, freno y motor) en la casa de máquinas (**Figura 2.c**) mediante despliegue cerrado de 2 cables de acero en paralelo de carro, uno por cada lado del carro, desde el tambor con poleas de reenvío en los extremos de las vigas y terminando a ambos extremos del carro (trolley ropes reeving, **Figura 2.e**). Se asume mecanismo con transmisión rígida y *1 cable de acero equivalente* de carro siempre tensado (tracción), con elasticidad longitudinal amortiguada.
- *Sistema de Izaje* de carga con cables desde el mecanismo de izaje (2 tambores con 2 frenos de emergencia, 1 reductor, 2 frenos y 2 motores acoplados) en la casa de máquina (**Figura 2.d**) mediante despliegue abierto de 4 cables de acero en paralelo de izaje, uno por cada esquina del headblock, desde los tambores con poleas de reenvío en extremo posterior de la viga principal, hacia poleas en el carro móvil y headblock (ida y vuelta, 2 partes) y del carro hasta el extremo frontal de la viga móvil; de modo tal que no varía la posición o altura de izaje al desplazarse el carro y hay relación de transmisión 2:1 en cables (hoist ropes reeving, **Figura 2.f**). Se asume mecanismo *equivalente* (1 tambor con 1 freno de emergencia, 1 reductor, 1 motor con 1 freno) con transmisión rígida y *1 cable de acero equivalente* de izaje con masa propia despreciable, *elástico* solo a tracción (no soporta compresión al apoyar).
- *Carga* (headblock/spreader con o sin container) asumida como masa concentrada en un punto material (centro de base de spreader), con 2 grados de libertad (g.d.l.) en el plano vertical 2D.
- Efectos externos: sólo se considera *aceleración gravitatoria (vertical) sobre la carga suspendida e interacción vertical de contacto o apoyo* por apilado “suave” (compresión dentro del límite elástico lineal) del spreader, con o sin container, con el perfil de obstáculos inferior (para tomar o liberar carga). Se desprecia la resistencia aerodinámica frontal al viento de la carga y del carro en movimiento.
- Sensores de retroalimentación (operación y emergencia):
 - a. Sistema de Encoder/Homing de posición instantánea en el eje de cada motor (carro e izaje).
 - b. Fines de carrera (limit switches) de operación (límites normales) y de emergencia (límites últimos, separados 0.50 m adicional al límite normal), en cada extremo del carro, fijos en la viga; y para izaje, rotativos en el tambor. Ver límites operativos de posición en **Sección 3.3**.
 - c. Detector de sobrevelocidad (O.S. switch) 115% de velocidad máxima en tambores (izaje y carro).
 - d. Celda de carga en polea de headblock para medir la tensión instantánea del cable de izaje.
 - e. Sensor de ángulo de spreader (cámara CCD en carro y emisor infrarrojo en headblock) para medir el ángulo vertical instantáneo (y velocidad angular) entre la carga y el carro (Ec. 1.d).
 - f. Sensor LIDAR de obstáculos (laser scanner infrarrojo 1D) en el carro (3 m hacia adelante del spreader) para medir la distancia vertical instantánea desde el carro en movimiento hasta la pila de obstáculos y apoyo abajo, y así relevar el perfil topográfico de obstáculos $y_{c0}(x, t)$, **Figura 3**.
- Comandos de operador e interfaz HMI (operación y emergencia) en la cabina bajo el carro:
 - a. Pulsador de Arranque/Parada *Normal* del Sistema de Control.
 - b. Pulsador “Hongo” rojo de Parada en *Emergencia*.
 - c. Dos (2) joysticks o palancas de mando (master switches) industriales para operación manual (una para el carro y otra para izaje) para dar consigna de dirección +/- de movimiento y referencia de velocidad instantánea, proporcional al desplazamiento de la palanca; con autoretorno a cero (resorte). Nota: utilizar un *joystick doble de consola de juegos*; o un *emulador de joysticks para dispositivo Android*, por ejemplo **Droid.joy Lite** (o Ultimate Gamepad, MAX.Joypad, etc.) comunicado con *DroidJoy server* (o el que corresponda) en PC con *Windows* para emularlas.

- d. Selectoras y/o pulsadores de selección de modo o función, display e indicadores de estado, según necesidad. Nota: utilizar un **Dashboard** en Simulink / **Visualization HMI** en CODESYS.

3.3. Límites operativos de movimiento (posición, velocidad, aceleración)

Referidos al sistema inercial de coordenadas cartesianas *globales* $x - y$ fijo al muelle, en **Figura 1.a**.

1. **Traslación de Carro:** eje x , horizontal (positivo $\rightarrow$ referido al riel en borde de muelle $x = 0$)

- Posición x_t : [-30.0 (sobre muelle) ... 0.0 ... (sobre barco) +50.0] m.
- Velocidad v_t máxima: +/- 4.0 m/s (cargado o sin carga).
- Aceleración $a_t = \frac{dv_t}{dt}$ máxima: +/- 0.80 m/s² (cargado o sin carga).

2. **Izaje de Carga:** eje y , vertical (positivo $\uparrow$ referido al nivel de muelle $y = 0$)

- Posición $y_h \equiv Y_{t0} - l_h$: [-20.0 (dentro de barco) ... 0.0 ... (sobre barco / muelle) +40.0] m.

Altura (fija) de poleas de suspensión de izaje en el Carro: $Y_{t0} = +45.0$ m.

Despeje mínimo sobre borde de muelle (viga testera o "sill beam"): $Y_{sb} = +5.0$ m.

- Velocidad v_h máxima: +/- 1.5 m/s (cargado con carga nominal); +/- 3.0 m/s (sin carga).

Nota: Operación a "**potencia constante**" (ver **Figura 5**) dependiendo de la carga total en cada movimiento, para un máximo aprovechamiento de la potencia instalada de izaje y reducción del tiempo de ciclo.

- Aceleración $a_h = \frac{dv_h}{dt}$ máxima: +/- 0.75 m/s² (cargado o sin carga).

3.4. Modelo Dinámico Híbrido simplificado del Sistema Físico Carro-Izaje-Carga en Interacción con el Ambiente

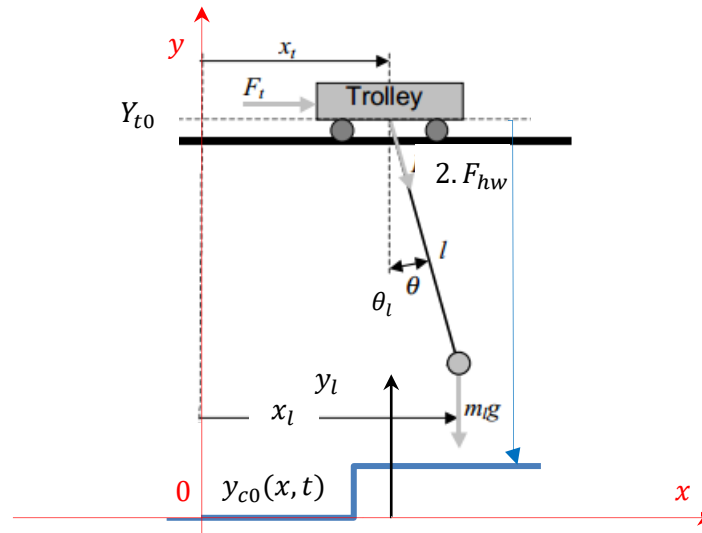


Figura 3: Modelo físico simplificado del subsistema Carro – Cable – Carga y Perfil de Obstáculos.

Restricción geométrica (posición relativa) del centro del carro al centro inferior del sistema de izaje (base de headblock/spreader), ya sea *suspendida* o *apoyada*, **Figura 1.b** y **Figura 3** (Ecuaciones *algebraicas* de acoplamiento entre coordenadas de posición globales (x, y) – locales (l, θ_l)):

$$x_l(t) = x_t(t) + l(t) \cdot \sin \theta_l(t) \Leftrightarrow \sin \theta_l(t) = \frac{x_l(t) - x_t(t)}{l(t)} (\geq 0) \quad (\text{Ec. 1.a})$$

$$y_l(t) = Y_{t0} - l(t) \cdot \cos \theta_l(t) \Leftrightarrow \cos \theta_l(t) = \frac{Y_{t0} - y_l(t)}{l(t)} (> 0) \quad (\text{Ec. 1.b})$$

o, complementariamente:

$$l(t) = +\sqrt{(x_l(t) - x_t(t))^2 + (Y_{t0} - y_l(t))^2} (> 0) \quad (\text{Ec. 1.c})$$

$$\Rightarrow \frac{dl(t)}{dt} = \frac{(x_l(t) - x_t(t)) \cdot (v_{lx}(t) - v_{tx}(t)) - (Y_{t0} - y_l(t)) \cdot v_{ly}(t)}{l(t)} (\geq 0) \quad (\text{Ec. 1.c'})$$

$$\theta_l(t) = \text{atan2}\left(\frac{x_l(t) - x_t(t)}{Y_{t0} - y_l(t)}\right) (\geq 0) \rightarrow \text{función atan2 (4 cuadrantes)} \quad (\text{Ec. 1.d})$$

Ángulo instantáneo de *balanceo* de la carga (sway angle): límite teórico $-\frac{\pi}{2} < \theta_l(t) < \frac{\pi}{2}$ (límite real *mucho menor*; pero *NO es válida la aproximación lineal simple* sin $\theta_l(t) \approx \theta_l(t)$; $\cos \theta_l(t) \approx 1$ para la operación dinámica de una grúa de muelle (STS): ver especificación en **Sección 4.2**).

Modelo dinámico híbrido equivalente del *sistema físico* (carro, izaje, carga), **en interacción** con: a) el *ambiente* (aceleración gravitatoria, apoyo o contacto con perfil de obstáculos); y b) el *sistema de control lógico* (twistlocks, frenos) y *continuo*. Consta de 2 tipos de variables concurrentes:

- Estados y entradas *continuos* (“fluyen”: “**flow**”) = *movimiento* (posición y velocidad angulares de motores de carro e izaje; posición y velocidad de traslación 2D de carga y de carro; torques, fuerzas; temperaturas, variables eléctricas, etc.).
- Estados y señales *discretos* o *discontinuos* (“saltan”: “**jump**”) = *modos operativos lógicos o booleanos* On-Off/Verdadero-Falso (twistlocks: abiertos-cerrados; contacto: suspendido-apoyado; cable elástico de izaje: tenso-flojo; frenos mecánicos de parking, NC: cerrado-abierto; alarmas por alcanzar umbrales límite operativos de variables continuas; etc.).

Ambiente:

- El planeta Tierra ejerce acción externa o *perturbación*: **aceleración gravitatoria** g sobre la grúa, carro, headblock/spreader, carga y obstáculos o apoyo.
- **Perfil 2D de obstáculos o superficie de apoyo vertical** $y_{c0}(x, t)$ para cada posición x (incluyendo muelle, sillbeams, barco, etc.). Cambia o evoluciona en el tiempo t con respecto al perfil inicial a medida que se deposita o toma un container $(TLK\downarrow/\uparrow)$ durante las maniobras de carga o descarga; puede cambiar también por otras causas externas (ej. si otro equipo, trailer, etc. deposita o retira container sobre muelle, o grúa se desplaza a otra bahía del barco, etc.).

Modo de Twistlocks (TLK): abiertos (Off) o cerrados (On) $\rightarrow$ afecta Altura inferior y Masa de carga.

OFF) Twistlocks **abiertos** (Off) $\Leftrightarrow$ Spreader **vacío** (sin container) $\rightarrow$

$$m_l(TLK = \text{Off}) = M_s; \quad h_c(TLK = \text{Off}) = 0 \text{ m} \quad (\text{Ec. 2.a/b})$$

ON) Twistlocks **cerrados** (On) $\Leftrightarrow$ Spreader **cargado** (con container) $\rightarrow$

$$m_l(TLK = \text{On}) = M_s + M_{cX}; \quad h_c(TLK = \text{On}) = H_c \quad (\text{Ec. 2.a'/b'})$$

- Condición de Carga *normal*: $M_{c_min} \leq M_{cX} \leq M_{c_max}$ según container, vacío hasta nominal;
- Condición de **Sobrecarga**: $M_{cX} > M_{c_max}$ (ver **Sección 3.7**).

Nivel 1 – Actuación discreta (salida digital) Cambio de modo de Twistlocks (TLK $\downarrow/\uparrow$) puede realizarse $\Leftrightarrow$ spreader totalmente apoyado sobre container (validación de estado, enclavamiento o interlock Nivel 1): (TLK $\downarrow$ = liberar o depositar container / TLK $\uparrow$ = tomar container)

$\rightarrow$ modifica Ambiente: **Perfil de obstáculos** o altura de **apoyo vertical**, en el lugar de apoyo:

$$y_{c0}(x, t_-) \rightarrow y_{c0}(x \in [x_l \pm W_c/2], t_+) = y_{c0}(x \in [x_l \pm W_c/2], t_-) \pm H_c \quad (\text{Ec. 2.c})$$

Modo de Contacto por Apoyo vertical: carga suspendida de cables por acción de g , no apoyada (Off) o apoyada (On) $\rightarrow$ reacción de vínculo elástico (sin deformación plástica) por compresión debido a g :

OFF) Carga **suspendida sin contacto** (solo por tensión de cable) $\Leftrightarrow (y_l(t) - h_c(TLK)) > y_{c0}(x_l, t) \rightarrow$

$$F_{cx}(t, (y_l(t) - h_c(TLK)) > y_{c0}(x_l, t)) = 0 \text{ N} \quad (\text{Ec. 3.a})$$

$$F_{cy}(t, (y_l(t) - h_c(TLK)) > y_{c0}(x_l, t)) = 0 \text{ N} \quad (\text{Ec. 3.b})$$

ON) Carga **apoyada** = **contacto vertical** solamente (tensión de cable reducida o nula) $\Leftrightarrow (y_l(t) - h_c(TLK)) \leq y_{c0}(x_l, t) \rightarrow$ Fuerza de contacto (reacción de vínculo vertical elástico amortiguado por compresión vertical; y fricción horizontal, si hay desplazamiento por "arrastre" horizontal en contacto):

$$F_{cx}(t, (y_l(t) - h_c(TLK)) \leq y_{c0}(x_l, t)) = -b_{cx} \cdot v_{lx}(t) \quad (\text{Ec. 3.a'/b'})$$

$$F_{cy}(t, (y_l(t) - h_c(TLK)) \leq y_{c0}(x_l, t)) = K_{cy} \cdot (y_{c0}(x_l, t) - (y_l(t) - h_c(TLK))) - b_{cy} \cdot v_{ly}(t)$$

Movimiento de la Carga:

$$m_l(TLK) \cdot \frac{dv_{lx}(t)}{dt} = -2 \cdot F_{hw}(t, l(t) \geq l_h(t)) \cdot \sin \theta_l(t) + F_{cx}(t, (y_l(t) - h_c(TLK)) \leq y_{c0}(x_l, t))$$

$$\frac{dx_l(t)}{dt} \equiv v_{lx}(t) \quad (\text{Ec. 4.a})$$

$$m_l(TLK) \cdot \frac{dv_{ly}(t)}{dt} = 2 \cdot F_{hw}(t, l(t) \geq l_h(t)) \cdot \cos \theta_l(t) + F_{cy}(t, (y_l(t) - h_c(TLK)) \leq y_{c0}(x_l, t)) - m_l(TLK) \cdot g$$

$$\frac{dy_l(t)}{dt} \equiv v_{ly}(t) \quad (\text{Ec. 4.b})$$

Modo de Cable de Izaje elástico amortiguado: 1 cable de acero equivalente con despliegue abierto, resiste *solo tracción*, "tensado" (On) $\rightarrow$ soporta carga; NO resiste compresión, "flojo" (Off) $\rightarrow$ se pandea o flexiona sin resistencia:

ON) Cable **tensado** (tracción por gravedad sobre carga suspendida), sin pandeo $\Leftrightarrow l(t) \geq l_h(t) \rightarrow$

$$F_{hw}(t, l(t) \geq l_h(t)) = K_{hw}(l_h(t)) \cdot 2 \cdot (l(t) - l_h(t)) + b_{hw}(l_h(t)) \cdot 2 \cdot \left(\frac{dl(t)}{dt} - \frac{dl_h(t)}{dt} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$K_{hw}(l_h(t)) \equiv \frac{k_{hwu}}{(2 \cdot l_h(t) + L_{h0})}; \quad b_{hw}(l_h(t)) \equiv b_{hwu} \cdot (2 \cdot l_h(t) + L_{h0}) \quad (\text{Ec. 5.a/b})$$

OFF) Cable **"flojo"** (carga apoyada), con flexión o pandeo $\Leftrightarrow l(t) < l_h(t) \rightarrow$

$$F_{hw}(t, l(t) < l_h(t)) = 0 \text{ N} \quad (\text{Ec. 5'})$$

Accionamiento del Sistema de Izaje (despliegue abierto de cable + tambor + freno emergencia + caja reductora + freno + motor):

$$Y_{t0} - l_h(t) \equiv y_h(t) \Rightarrow -\frac{dl_h(t)}{dt} = \frac{dy_h(t)}{dt} \equiv v_h(t); \quad (\text{Ec. 6.a})$$

$$2 \cdot v_h(t) = r_{hd} \cdot \omega_{hd}(t); \quad F_{hw}(t, l(t) \geq l_h(t)) \cdot r_{hd} = T_{hdl}(t) \quad (\text{Ec. 6.b})$$

$$J_{hd+hEb} \cdot \frac{d\omega_{hd}(t)}{dt} = T_{hd}(t) + T_{hEb}(t, (BRK_{hE})) - b_{hd} \cdot \omega_{hd}(t) - T_{hdl}(t) \quad (\text{Ec. 6.c})$$

$$\frac{d\theta_{hd}(t)}{dt} \equiv \omega_{hd}(t) \quad (\text{Ec. 6.c'})$$

$$\omega_{hd}(t) \cdot i_h = \omega_{hm}(t); \quad T_{hd}(t) = i_h \cdot T_{hml}(t) \quad (\text{Ec. 6.d})$$

$$J_{hm+hEb} \cdot \frac{d\omega_{hm}(t)}{dt} = T_{hm}(t) + T_{hb}(t, (BRK_h)) - b_{hm} \cdot \omega_{hm}(t) - T_{hml}(t) \quad (\text{Ec. 6.e})$$

$$\frac{d\theta_{hm}(t)}{dt} \equiv \omega_{hm}(t) \quad (\text{Ec. 6.e'})$$

Carro, cable de carro elástico amortiguado y Accionamiento de Traslación del Carro (carro + despliegue cerrado de cable + tambor + caja reductora + motor + freno):

$$M_t \cdot \frac{dv_t(t)}{dt} = F_{tw}(t) - b_t \cdot v_t(t) + 2 \cdot F_{hw}(t, l(t)) \cdot l_h(t) \cdot \sin \theta_l(t) \quad (\text{Ec. 7.a})$$

$$\frac{dx_t(t)}{dt} \equiv v_t(t) \quad (\text{Ec. 7.a'})$$

$$F_{tw}(t) = K_{tw} \cdot (x_{td}(t) - x_t(t)) + b_{tw} \cdot (v_{td}(t) - v_t(t)) \quad (\text{Ec. 7.b})$$

$$v_{td}(t) = r_{td} \cdot \omega_{td}(t); \quad F_{tw}(t) \cdot r_{td} = T_{tdl}(t); \quad \frac{dx_{td}(t)}{dt} \equiv v_{td}(t) \quad (\text{Ec. 7.c})$$

$$J_{td} \cdot \frac{d\omega_{td}(t)}{dt} = T_{td}(t) - b_{td} \cdot \omega_{td}(t) - T_{tdl}(t); \quad \frac{d\theta_{td}(t)}{dt} \equiv \omega_{td}(t) \quad (\text{Ec. 7.d/d'})$$

$$\omega_{td}(t) \cdot i_t = \omega_{tm}(t); \quad T_{td}(t) = i_t \cdot T_{tml}(t) \quad (\text{Ec. 7.e})$$

$$J_{tm+tb} \cdot \frac{d\omega_{tm}(t)}{dt} = T_{tm}(t) + T_{tb}(t, (BRK_t)) - b_{tm} \cdot \omega_{tm}(t) - T_{tml}(t) \quad (\text{Ec. 7.f})$$

$$\frac{d\theta_{tm}(t)}{dt} \equiv \omega_{tm}(t) \quad (\text{Ec. 7.f'})$$

Controladores internos de Torque en Accionamientos (*Modulador de Torque idealizado equivalente, modelo simplificado de primer orden LTI en tiempo "continuo" con consigna de torque en tiempo discretizado* $k \cdot T_{s2} \leq t < (k+1) \cdot T_{s2}$ y Limitador de Torque máximo para protección del motor).

Modulador de Torque en motor-drive de **Izaje** (en Ec. 6.e), con Limitador de Torque máx. (y reducción cuadrática del mismo en rango de velocidades mayores a la nominal del motor, Field Weakening):

$$\tau_{hm} \cdot \frac{dT_{hm}(t)}{dt} = T_{hm \text{ Lim}}^*(t) - T_{hm}(t) \quad (\text{Ec. 6.f})$$

$$T_{hm \text{ Lim}}^*(k \cdot T_{s2} \leq t < (k+1) \cdot T_{s2}) = \min \left(+T_{hm \text{ Max}}, \max(-T_{hm \text{ Max}}, T_{hm}^*(k \cdot T_{s2})) \right) \quad (\text{Ec. 6.f'})$$

$$T_{hm \text{ Max}} = T_{hm \text{ MAX}} \cdot \min \left(1, \left(\frac{\omega_{hm \text{ RATED}}}{\omega_{hm}(t)} \right)^2 \right) \quad (\text{Ec. 6.f''})$$

Modulador de Torque en motor-drive de **Carro** (en Ec. 7.f), con Limitador de Torque máx.:

$$\tau_{tm} \cdot \frac{dT_{tm}(t)}{dt} = T_{tm \text{ Lim}}^*(t) - T_{tm}(t) \quad (\text{Ec. 7.g})$$

$$T_{tm \text{ Lim}}^*(k \cdot T_{s2} \leq t < (k+1) \cdot T_{s2}) = \min \left(+T_{tm \text{ Max}}, \max(-T_{tm \text{ Max}}, T_{tm}^*(k \cdot T_{s2})) \right) \quad (\text{Ec. 7.g'})$$

Modos de Freno mecánico disipativo con disco y calipers, para *parking* (BRK): NC (Normal Cerrado) cuando está desenergizado (Off), torque de fricción mecánica por resorte con saturación; abierto (On) cuando está energizado con actuador electro-hidráulico (vale para *frenos de operación* en eje rápido de mecanismos de **Carro** (BRK_t) e **Izaje** (BRK_h) y *freno de emergencia* de Izaje en eje lento (BRK_{hE})).

Freno de emergencia de **Izaje**, en eje lento tambor (en Ec. 6.c):

OFF) Freno **desenergizado** (Off) = cerrado $\Leftrightarrow$ Torque de Frenado por fricción, limitado $\rightarrow$

$$T_{hEb}(t) = -b_{hEb} \cdot \omega_{hd}(t), \text{ saturado: } -T_{hEb \text{ Max}} < T_{hEb}(t) < +T_{hEb \text{ Max}}, \text{ o equivalentemente:}$$

$$T_{hEb}(t, (BRK_{hE} = \text{Off})) = \min \left(+T_{hEb \text{ Max}}, \max(-T_{hEb \text{ Max}}, -b_{hEb} \cdot \omega_{hd}(t)) \right) \quad (\text{Ec. 6.g})$$

NOTA: Función alternativa *continua*, más efectiva y abrupta: tangente hiperbólica escalada

$$T_{hEb}(t, (BRK_{hE} = \text{Off})) = -T_{hEb \text{ Max}} \cdot \tanh(b_{hEb} \cdot \omega_{hd}(t)) \quad (\text{Ec. 6.g})$$

ON) Freno **energizado** (On) = abierto →

$$T_{hb}(t, (BRK_{hE} = \text{On})) = 0 \text{ N.m} \quad (\text{Ec. 6.g'})$$

Freno de operación de **Izaje**, en eje rápido motor (en Ec. 6.e):

OFF) Freno **desenergizado** (Off) = cerrado ⇔ Torque de Frenado por fricción, limitado →

$$T_{hb}(t) = -b_{hb} \cdot \omega_{hm}(t), \text{ saturado: } -T_{hb \text{ Max}} < T_{hb}(t) < +T_{hb \text{ Max}}, \text{ o equivalentemente:}$$

$$T_{hb}(t, (BRK_h = \text{Off})) = \min\left(+T_{hb \text{ Max}}, \max(-T_{hb \text{ Max}}, -b_{hb} \cdot \omega_{hm}(t))\right) \quad (\text{Ec. 6.h})$$

NOTA: Función alternativa *continua*, más efectiva y abrupta: tangente hiperbólica escalada

$$T_{hb}(t, (BRK_h = \text{Off})) = -T_{hb \text{ Max}} \cdot \tanh(b_{hb} \cdot \omega_{hm}(t)) \quad (\text{Ec. 6.h})$$

ON) Freno **energizado** (On) = abierto →

$$T_{hb}(t, (BRK_h = \text{On})) = 0 \text{ N.m} \quad (\text{Ec. 6.h'})$$

Freno de operación de **Carro**, en eje rápido motor (en Ec. 7.f):

OFF) Freno **desenergizado** (Off) = cerrado ⇔ Torque de Frenado por fricción, limitado →

$$T_{tb}(t) = -b_{tb} \cdot \omega_{tm}(t), \text{ saturado: } -T_{tb \text{ Max}} < T_{tb}(t) < +T_{tb \text{ Max}}, \text{ o equivalentemente:}$$

$$T_{tb}(t, (BRK_t = \text{Off})) = \min\left(+T_{tb \text{ Max}}, \max(-T_{tb \text{ Max}}, -b_{tb} \cdot \omega_{tm}(t))\right) \quad (\text{Ec. 7.h})$$

NOTA: Función alternativa *continua*, más efectiva y abrupta: tangente hiperbólica escalada

$$T_{tb}(t, (BRK_t = \text{Off})) = -T_{tb \text{ Max}} \cdot \tanh(b_{tb} \cdot \omega_{tm}(t)) \quad (\text{Ec. 6.h})$$

ON) Freno **energizado** (On) = abierto →

$$T_{tb}(t, (BRK_t = \text{On})) = 0 \text{ N.m} \quad (\text{Ec. 7.h'})$$

Cambio de modo de **frenos de operación**, para carro e izaje:

Enclavamiento en Nivel 1: actuación de Freno ($BRK \uparrow$ = energizar o abrir Freno) puede realizarse ⇔ validación de Torque Motor disponible (**Torque Proving logic**) / $BRK \downarrow$ = desenergizar o cerrar Freno ⇔ validación desacelerando y $|\omega_{xm}(t)| < \omega_{xm \text{ MinBRK}}$; ó **Nivel 0** Parada de EMERGENCIA: $BRK \downarrow$ = desenergizar o cerrar Freno *inmediatamente* (no importa el estado de movimiento), desactivando torque del motor.

Cambio de modo de **freno de emergencia**, para izaje:

Enclavamiento en Nivel 1: actuación de Freno ($BRK \uparrow$ = energizar o abrir Freno) puede realizarse ⇔ Sistema de Control de grúa se activa o habilita (arranque) $ON \uparrow$ y NO hay falla de Emergencia / $BRK \downarrow$ = desenergizar o cerrar Freno ⇔ Sistema de Control de grúa se desactiva (apagado) $OFF \uparrow$; ó **Nivel 0** Parada de EMERGENCIA: $BRK \downarrow$ = desenergizar o cerrar Freno *inmediatamente* (no importa el estado de movimiento).

3.5. Parámetros del Sistema Físico

$Y_{t0} = +45.0 \text{ m}$ Altura (fija) de poleas de suspensión de Izaje en el Carro
(desde el nivel de muelle, ver **Figura 3**).

$H_c = 2.59 \text{ m}$; $W_c = 2.44 \text{ m}$ Altura y ancho de Container Estándar (normalizado: ISO Containers).

Nota: Altura varía según container: Estándar, HQ, etc. (aquí considerar una sola altura).

$M_s = 15000 \text{ kg}$ Masa de Spreader + Headblock (sin container).

$M_{c \text{ max}} = 50000 \text{ kg}$ Masa nominal de Container/s a izar (máxima totalmente cargado).

$M_{c \text{ min}} = 2000 \text{ kg}$ Masa de Container Estándar vacío (mínima, sin carga interna).

$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ Aceleración gravitatoria (valor estándar sobre el nivel del mar).

Perturbación externa constante.

Carga apoyada, parámetros de **contacto** (carga-apoyo) → reacción de vínculo (compresión):

$$K_{cy} = 1.8 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad \text{Rigidez de compresión por contacto vertical (carga comprime apoyo).}$$

$$b_{cy} = 10.0 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m/s}} \quad \text{Fricción interna o amortiguamiento de compresión por contacto vertical.}$$

$$b_{cx} = 1.0 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m/s}} \quad \text{Fricción de arrastre horizontal por contacto vertical.}$$

Cable de acero (wirerope) de izaje equivalente, parámetros unitarios (por metro de cable desplegado):

$$k_{hwu} = \left(236 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}} \right) \cdot \text{m} \quad \text{Rigidez unitaria a tracción (tensión por peso de carga), por metro de cable.}$$

$$b_{hwu} = \left(150 \frac{\text{N}}{\text{m/s}} \right) / \text{m} \quad \text{Fricción interna o amortiguamiento unitario a tracción (rozamiento interno).}$$

$$L_{h0} = 110 \text{ m} \quad \text{Longitud de despliegue fijo de wirerope de izaje (desde el tambor hasta el extremo fijo), en adición a las 2 partes colgantes (péndulo) variable } l_h(t).$$

Accionamiento del Sistema de Izaje:

$$r_{hd} = 0.75 \text{ m} \quad \text{Radio primitivo de tambor (enrollado helicoidal, 1 sola corrida de cable).}$$

$$J_{hd+heb} = 3800 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad \text{Momento de inercia equivalente del eje lento (tambor, disco de freno de emergencia y etapa de salida de caja reductora).}$$

$$b_{hd} = 8.0 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}} \quad \text{Coeficiente de Fricción mecánica viscosa equivalente del eje lento.}$$

$$b_{heb} = 2.2 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}} \quad \text{Coeficiente de Fricción viscosa equivalente del Freno de emergencia cerrado.}$$

$$T_{heb \text{ Max}} = 1.1 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{Torque máximo de frenado del Freno de emergencia cerrado.}$$

$$i_h = 22.0 : 1 \quad \text{Relación de transmisión total de caja reductora de engranajes.}$$

$$J_{hm+hb} = 30.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad \text{Momento de inercia equivalente del eje rápido (motor, disco de freno de operación y etapa de entrada de caja reductora).}$$

$$b_{hm} = 18.0 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}} \quad \text{Coeficiente de Fricción mecánica viscosa equivalente del eje rápido.}$$

$$b_{hb} = 100 \times 10^6 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}} \quad \text{Coeficiente de Fricción viscosa equivalente del Freno de operación cerrado.}$$

$$T_{hb \text{ Max}} = 50.0 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{Torque máximo de frenado del Freno de operación cerrado.}$$

$$\tau_{hm} = 1.0 \text{ ms} \quad \text{Constante de tiempo de Modulador de Torque en motor-drive de izaje.}$$

$$T_{hm \text{ Max}} = 20.0 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{Torque máximo de motorización/frenado regenerativo del motor.}$$

Carro y cable de acero (wirerope) de carro equivalente:

$$M_t = 30000 \text{ kg} \quad \text{Masa equivalente de Carro, ruedas, efecto de carros catenaria, etc..}$$

$$b_t = 90.0 \frac{\text{N}}{\text{m/s}} \quad \text{Coeficiente de Fricción mecánica viscosa equivalente del Carro.}$$

$$K_{tw} = 480 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad \text{Rigidez equivalente total a tracción de cable tensado de carro.}$$

$$b_{tw} = 3.0 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m/s}} \quad \text{Fricción interna o amortiguamiento total de cable tensado de carro.}$$

Accionamiento de Traslación del Carro:

$$r_{td} = 0.50 \text{ m} \quad \text{Radio primitivo de tambor (enrollado helicoidal, 1 sola corrida de cable).}$$

$$J_{td} = 1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad \text{Momento de inercia equivalente del eje lento (tambor y etapa de salida de caja reductora).}$$

$$b_{td} = 1.8 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}} \quad \text{Coeficiente de Fricción mecánica viscosa equivalente del eje lento.}$$

$$i_t = 30.0 : 1 \quad \text{Relación de transmisión total de caja reductora de engranajes.}$$

$J_{tm+tb} = 7.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	Momento de inercia equivalente del eje rápido (motor, disco de freno de operación y etapa de entrada de caja reductora).
$b_{tm} = 6.0 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}}$	Coeficiente de Fricción mecánica viscosa equivalente del eje rápido.
$b_{tb} = 5.0 \times 10^6 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}}$	Coeficiente de Fricción viscosa equivalente del Freno de operación cerrado.
$T_{tb \text{ Max}} = 5.0 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}$	Torque máximo de frenado del Freno de operación cerrado.
$\tau_{tm} = 1.0 \text{ ms}$	Constante de tiempo de Modulador de Torque en motor-drive de carro.
$T_{tm \text{ Max}} = 4.0 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}$	Torque máximo de motorización/frenado regenerativo del motor.

3.6. Escenarios de Simulación o Análisis: Estado o Situación Inicial consistente

Para cada escenario a simular o analizar, se debe definir un **estado inicial de todo sistema físico** en forma **consistente y realista** (ej. sistema detenido en equilibrio horizontal y vertical cargado con spreader vacío en posición inicial suspendido, o apoyado con o sin tensión de cable, etc., y **acorde con la situación inicial del sistema híbrido de control**.

Nota: tener en cuenta la definición del concepto de “**estado**” **energético instantáneo** de un sistema dinámico físico (resume toda la historia pasada del sistema, sin explicitar cómo llegó al mismo); complementado ahora con el concepto de “**situación**” **de un sistema de estados discretos**.

3.7. Emulación realista de parámetros físicos variables, entradas DI/AI y detección de condiciones del sistema físico:

Los *estados discretos o lógicos* (V/F) de la planta (cargado/descargado, activación de fines de carrera al superar posiciones extremas, etc.) deben emularse correctamente dentro del modelo del *sistema físico* y retroalimentarse a través de “entradas lógicas o digitales”. Los *estados continuos* de la planta necesarios para el sistema de control deben medirse con sensores o estimarse. No deben utilizarse valores supuestos a priori o asignados directamente dentro del sistema de control, sino que deben ser retroalimentaciones de señales de la planta a partir de sensores u observadores; ya sea de señales continuas (analógicas) o discretas (digitales) hacia entradas correspondientes del sistema de control, según corresponda.

El valor de *masa de los distintos contenedores* a transportar, M_{cX} , debe asignarse dentro del modelo del *sistema físico*, con un patrón aleatorio predefinido, tal que $M_{c_min} \leq M_{cX} \leq M_{c_max}$ (no utilizar solo esos valores extremos permitidos sino también casos intermedios; más algún caso de “*sobrecarga*”, $M_{cX} > M_{c_max}$). El sistema de control *no conoce a priori* la masa de cada contenedor a izar, sino que debe estimarla a partir de la **medición de $F_{hw}(t)$** (fuerza de tensión del cable de izaje) mediante *celda de carga* (sensor de F_{hw}) durante la maniobra inicial suave (con aceleración despreciable) de “despegue” de la carga de su apoyo; la estimación de masa debe realizarse con una precisión del 1%, en el menor tiempo posible para no afectar a la productividad esperada de la grúa. El sistema de control debe utilizar dicha estimación de masa a fin de detectar condición *anormal (alarma)* de “*sobrecarga*”, en cuyo caso debe detener rápidamente (parada normal, no es emergencia) e inhibir toda maniobra de izaje, permitiendo solo descender manualmente la carga a velocidad limitada al 10% y liberarla; en condiciones normales debe ajustar la velocidad máxima de izaje dependiendo de la masa total de carga, para operar a “potencia constante”, ver **Figura 5**.

Para realizar las maniobras de apoyo y toma/liberación de carga en forma suave con velocidad limitada, a fin de evitar o reducir colisiones, golpes o “tirones” de cable de izaje, el Nivel 1 (control supervisor) debe implementar la **detección de cable de izaje “flojo”**, calibrada adecuadamente y en forma realista, cuando el cable se destensa al apoyar el spreader sobre un container, o un container sobre otro container, trailer o muelle; o cuando el cable se empieza a tensar, al comenzar a izar. Para ello se utiliza el modelo simple de la dinámica de contacto vertical entre la carga (spreader o container) y la superficie de apoyo “rígida” correspondiente, toda vez que ocurre un contacto (ver modelo en **Sección 3.4**).

4. Especificación de Requisitos del Sistema de Control y Protección

4.1. Estructura y funciones del Sistema de Control y Protección

El *Sistema Híbrido de Control y Protección* debe incluir 3 niveles jerárquicos (jerarquía creciente):

- **Nivel 2 - Control Regulatorio:** estados continuos, muestreados en t. discretizado, $T_{s2} = 1$ ms.
- **Nivel 1 - Control Supervisor:** autómata, estados discretos activado por eventos, $T_{s1} = 20$ ms.
- **Nivel 0 – Seguridad o Protección** (separado): en standby, actúa ante situaciones de emergencia (pulsador emergencia, sobrevelocidad, fines de carrera últimos, etc.), llevando el sistema a un estado seguro, $T_{s0} = 20$ ms.

Nota: los periodos de ciclo/muestreo propuestos son tentativos, a verificar a partir de los requisitos de desempeño.

Estos niveles del *Sistema Híbrido de Control y Protección* deben atender los siguientes requisitos:

Nivel 2: Controladores de Movimiento, de *estados continuos muestreados en tiempo discretizado* (control regulatorio de lazo cerrado), que reciben consignas de movimiento individuales del Control Supervisor (Nivel 1) para *control directo de cada uno de los movimientos principales* (izaje y traslación); están basados en accionamientos electro-mecánicos de 4 cuadrantes (esquema de control de movimiento en cascada con modulador de torque, debe incorporar aquí los *lazos externos de control de movimiento* en tiempo discreto para cada accionamiento, con la consigna de torque $T_m^*(k, T_{s2})$ a enviar al *modulador de torque* equivalente interno correspondiente en tiempo “continuo”. Debe incorporarse el **control automático de balanceo** de la carga (ver **Sección 4.2**).

Nivel 1: Control Supervisor global, de *estados discretos activados por eventos* (autómata secuencial), con *estructura interna 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, detección de sobrecarga, operación de twistlocks, 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, sobret temperatura en motores, etc.) y *Fallas/fallos* (ej. sobrevelocidad, sobrepaso de límites de operación, no seguimiento de consignas, etc.).

Nivel 0: Seguridad o Protección 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.

4.2. Control automático (amortiguación) de oscilación de la carga

El controlador de movimiento de traslación de carro debe incorporar la función adicional de *control automático retroalimentado (lazo cerrado) de balanceo de la carga* en el plano vertical durante la operación, a fin de *amortiguar la oscilación durante la trayectoria alrededor del punto de equilibrio dinámico variable* y reducir la oscilación remanente una vez detenido el carro en la posición final (punto de equilibrio vertical). Para ello, la máquina cuenta con un *sensor de ángulo* instantáneo entre el cabezal que toma la carga y el carro, con respecto a la vertical, por ej. emisor infrarrojo en cabezal (headblock/spreader) y detector en carro: cámara CCD infrarroja con procesador que calcula el ángulo y velocidad angular. 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 (en la operación dinámica de la grúa de muelle (STS) *NO es válida la aproximación lineal simple* $\sin \theta_l(t) \approx \theta_l(t)$; $\cos \theta_l(t) \approx 1$); este compensador de error de ángulo debe operar en paralelo con el controlador de movimiento del carro, modulando el torque/aceleración proveniente del controlador de movimiento (control *subactuado*: 1 variable de manipulación y 2 grados de libertad).

Las *especificaciones de desempeño* son: ángulo máximo (respecto al eje vertical) durante aceleración/desaceleración = $\pm 20^\circ$; ángulo máximo durante trayectoria a velocidad "constante" = $\pm 5^\circ$; ángulo residual al completar movimiento y detener carro = $\pm 1^\circ$. Amortiguamiento relativo "crítico" de la oscilación.

Nota: El control de ángulo debe poder desactivarse o activarse mediante una selectora de modo, a fin de operar y evaluar comparativamente el desempeño del sistema semi-automático en ambos casos.

4.3. Ciclos 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 (supervisado por el sistema de control), para maniobras de aproximación sobre barco o muelle, toma/liberación de carga (suave, a velocidad limitada con *detección de cable de izaje "flojo"* al apoyar o tomar carga para reducir colisiones, golpes o "tirones" de cable) 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 eficientes y coordinadas (con simultaneidad o solapamiento temporal) de los movimientos de izaje y traslación entre barco y muelle (cada "maniobra unitaria" de izaje, traslación de carro y descenso con "perfil base" trapezoidal de velocidad, a su máxima aceleración y velocidad permitidas, limitada o suavizada solo por control de sway y jerk), a fin de optimizar (reducir) tiempos de ciclo de operación y aumentar la productividad global, aprovechar al máximo los accionamientos y optimizar el consumo de energía, disminuyendo a su vez la fatiga del operador; *evitando cualquier posible colisión* con obstáculos.

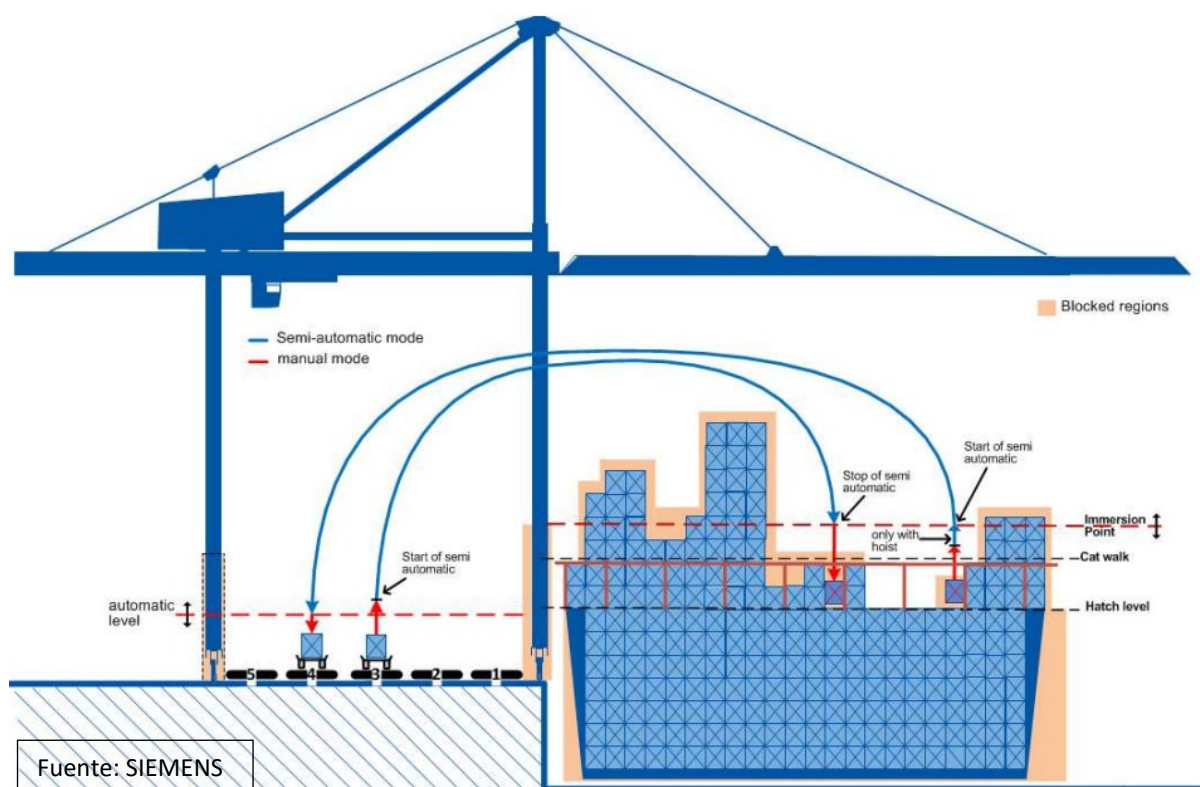


Figura 4: Trayectorias de Operación Semi-Automática en Grúa Portuaria de Muelle tipo Pórtico

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

- a) **Configuración inicial**: el operador ajusta, mediante interfaz hombre-máquina (HMI),

- límites de traslación iniciales: 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 inicial (despeje de obstáculos: viga testera, contenedores apilados iniciales vs. límite superior), alturas mínimas 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 suave “en movimiento” [bumpless transfer] a **Modo Automático**: Trayectoria de izaje, traslación (hacia lado opuesto), descenso y detención (o transferencia suave “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: 1) de **carga** (→ cargado hacia barco; ← vacío hacia muelle); 2) de **descarga** (→ vacío hacia barco; ← cargado hacia muelle).

- **Ciclo doble (carga y descarga)**: Como alternativa al ciclo de operación simple (carga ó descarga), el autómatas 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 (→ cargado hacia barco; ← cargado hacia muelle, desde dos posiciones de barco variables hacia dos carriles distintos fijos lado muelle).

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**).

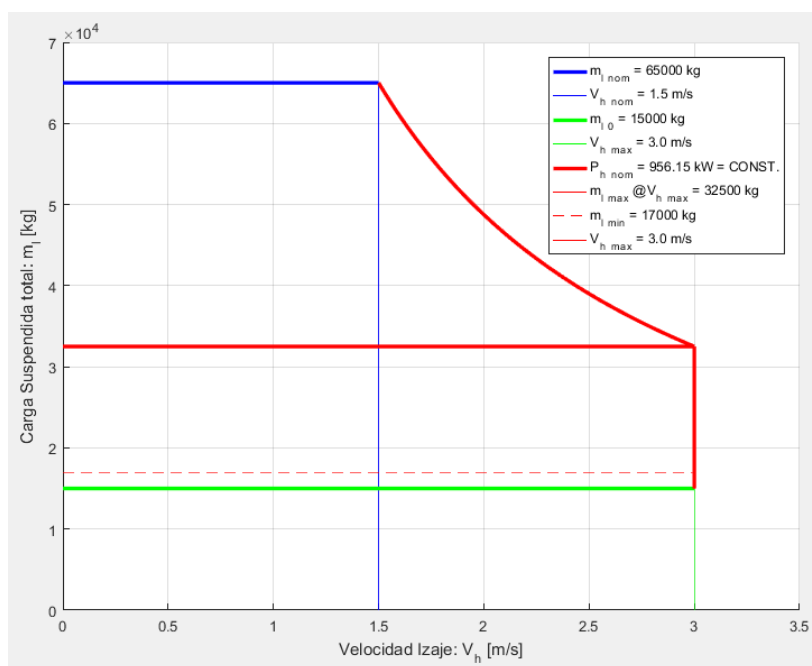


Figura 5: Característica de Potencia Constante - Carga suspendida vs. velocidad izaje

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 (container debajo de spreader) 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→Auto**: sin detención, a partir de “estado” de movimiento “inicial” llevar a estado deseado con rampa sin desacelerar ni detener; **Auto→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.

La **productividad** de esta grúa, para Ciclos *Simples* repetitivos de operación, debe ser no menor que **30 contenedores movidos por hora** (duración de cada ciclo completo: no más de 2 minutos, ida cargado y retorno descargado, en el caso de recorridos exigidos promedio).