

# 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 fundamentales de la Asignatura en una aplicación concreta, a partir de especificaciones de requerimientos simplificadas.

Desarrollo e implementación de un **autómata híbrido de control y protección para operación semi-automática coordinada** en una **grúa portacontenedores portuaria de muelle tipo pórtico** (Figura 1). Incluye: diseño, modelado conceptual y análisis de desempeño mediante simulación “Model-in-the-Loop” (Simulink/Stateflow); e implementación en entorno de programación de autómatas industriales según norma IEC 61131 (CODESYS) y simulación “Software-in-the-Loop” (emulación o co-simulación).



Figura 1: Grúa Portuaria de Muelle tipo Pórtico

## 2. Lineamientos

- Trabajo *en equipo* 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. Anexos. (Ver documentos complementarios de referencia: Guía y Plantilla para preparar Informe Técnico.)
- **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: 1° Semestre de 2021 (fecha a coordinar).  
Nota: para fechas posteriores, utilizar última versión vigente de esta Guía de Trabajo.

### 3. Especificaciones del Sistema de Control y Protección

#### 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 (cabezal 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), para operación suave y eficiente con *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**).

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.

#### 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 alrededor del punto de equilibrio dinámico* y oscilación remanente una vez detenido el carro en la posición final. 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; 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).

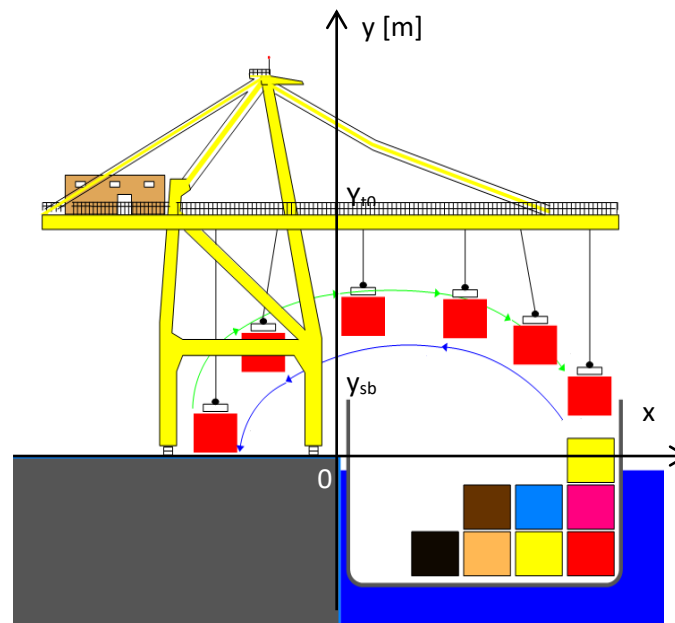
Las *especificaciones de desempeño* son: ángulo máximo durante aceleración/desaceleración =  $\pm 20^\circ$ ; ángulo máximo durante trayectoria a velocidad "constante" =  $\pm 5^\circ$ ; ángulo residual al completar movimiento y detener carro =  $\pm 1^\circ$ .

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. 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 de izaje y traslación coordinada entre barco y muelle a máxima velocidad posible, a fin de reducir tiempos y aumentar la productividad, disminuyendo a su vez la fatiga del operador.



**Figura 2: Esquema de Operación Semi-Automática de una Grúa Portuaria de Muelle tipo Pórtico**

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):

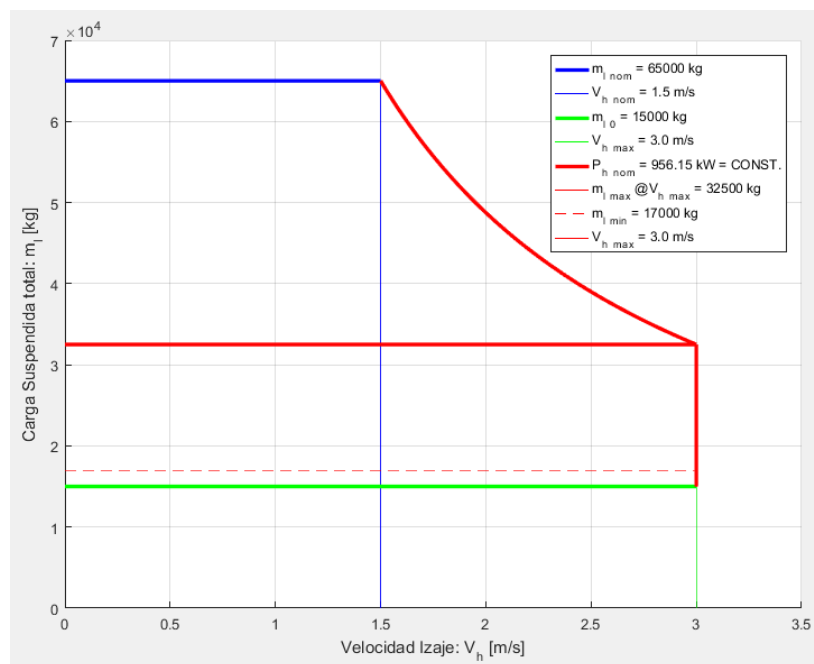
- a) **Configuración (o aprendizaje)**: el operador ajusta, mediante interfaz hombre-máquina (HMI),
  - límites de traslación: sobre muelle, carril/es fijo/s (carga o descarga); y sobre barco, posición objetivo fija [0] o incremental [+/-1] (el operador puede luego alterar en modo manual la posición de re-inicio del modo automático);
  - altura de izaje máxima (despeje de obstáculos: viga testera, contenedores apilados iniciales vs. límite superior), 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 suave "en movimiento" 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 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 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 potencia instalada en motores y reducir tiempo de ciclo con cargas menores a la nominal, hipérbola en **Figura 3**).



**Figura 3: 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 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. Especificaciones del Sistema Físico a controlar y su modelado

### 4.1. Hipótesis simplificadoras

- Estructura de pórtico totalmente rígida.
- Carro soportado por la estructura rígida; desplazamiento horizontal (tracción) sin resbalamiento.
- Sistema de izaje de carga (motor, tambor y cable) totalmente sobre el carro, se desplazan horizontalmente juntos ("Machinery on Trolley"); 1 cable de acero equivalente elástico sin masa propia, trabajando a tracción (no soporta compresión).

Nota: esta configuración "Machinery on Trolley" es poco utilizada por su peso y costo, pero es más simple de modelar (actualmente se prefiere colocar la maquinaria de izaje en una casa de Máquinas fija sobre la estructura, separada del carro que se desplaza, incorporando un sistema de poleas de reenvío de cable más complejo pero que aliviana el carro y la estructura del pórtico).

- Efectos externos: resistencia aerodinámica frontal 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 → 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 a "**potencia constante**" (ver **Figura 3**) dependiendo de la carga total en cada movimiento, máximo aprovechamiento de 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) Spreader vacío:  $m_i = m_{i0} = 15000 \text{ kg}$  (sin carga, altura 0.0 bajo spreader)

b) Spreader 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**:

- Rigidez y fricción vertical (compresión):  $K_{cy} = 1.3 \times 10^6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ ;  $b_{cy} = 500 \frac{\text{kN}}{\text{m/s}}$ ;
- Fricción horizontal (arrastre):  $b_{cx} = 1000 \frac{\text{kN}}{\text{m/s}}$ .

#### 4.4. Cadena cinemática de accionamientos

- Considerar modelos de control de movimiento de accionamientos 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 cada motor (carro/izaje): calcular a partir de aceleración máxima desacoplado (dimensionamiento)  $\rightarrow$  saturar consigna  $T_m^*(t)$  en controlador (protección).
2. **Traslación de carro:**  $\rightarrow$  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  $\rightarrow$  definir  $b_m, b_w$
3. **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  $b_m, b_d$ .

#### 4.5. Modelo dinámico no-lineal 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* [ $y_l(t) > y_{c0}(x, t)$ ]:

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

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

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

$$m_l \cdot \ddot{x}_l(t) = -F_w(t) \cdot \sin \theta(t) - b_{cx} \cdot \dot{x}_l(t) \quad (\text{Ec. 1.a'})$$

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

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:  $l(t) < l_h(t)$

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

Carro y Accionamiento Traslación:  $M_t \cdot \ddot{x}_t(t) = F_t(t) - b_t \cdot \dot{x}_t(t) + F_w(t) \cdot \sin \theta(t) \quad (\text{Ec. 3})$

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

Restricción geométrica entre carro, cable tensado y carga (Ecuaciones algebraicas adicionales):

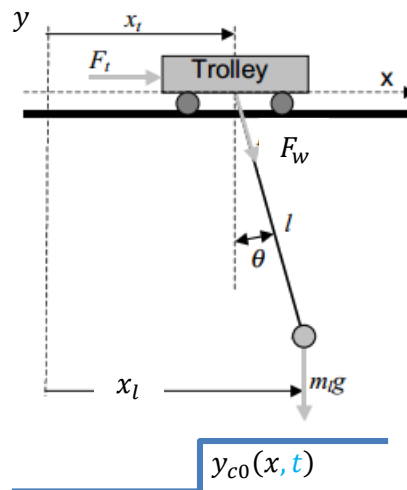
$$x_l(t) = x_t(t) + l(t) \cdot \sin \theta(t) \quad (\text{Ec. 5.a})$$

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

o, equivalentemente (Utilizar función **atan2** [4 cuadrantes, dado que ángulo toma valores negativos]):

$$l(t) = \sqrt{(x_l(t) - x_t(t))^2 + (y_{t0} - y_l(t))^2}; \quad \tan \theta(t) = \frac{x_l(t) - x_t(t)}{y_{t0} - y_l(t)}$$

Límites de ángulo:  $-\frac{\pi}{2} < \theta(t) < \frac{\pi}{2}$  (en la práctica, ángulo menor: ver especificaciones en **Sección 3.2**)



**Figura 4: Modelo físico idealizado** (ver Nota)

**Nota:** considerar sentido de eje **y** positivo  $\uparrow$  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**).

#### 4.6. Emulación de Contacto al apoyar o tomar carga:

A fin de calibrar adecuadamente y en forma más realista el control supervisor para realizar las maniobras de toma/liberación de carga (suave, a velocidad limitada con *detección de cable de izaje “flojo”* al apoyar o tomar carga sobre otro container, trailer o muelle, para reducir colisiones, golpes o “tirones” de cable), es necesario emular con modelo simple 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 4.5**); y la conmutación del valor de masa cuando se toma o libera un container (ver **Sección 4.3**).

#### 4.7. Condición o Estado Inicial consistente:

Para simulación, definir estado inicial del sistema físico *consistente y realista* (ej. equilibrio vertical cargado con spreader vacío en posición inicial suspendido sobre muelle, o apoyado con emulación de contacto, acorde con situación inicial del autómata híbrido de control (tener en cuenta definición de “estado” energético instantáneo de un sistema dinámico físico).