

Proyecto Global Integrador:

Control Semi-Automático Coordinado de Grúa Portuaria de Muelle tipo Pórtico

Alumnos

Pavéz Fabriani Eduardo Martín
Olguin Nahuel Brian

Año

2023

Resumen

En este informe se desarrolló un sistema híbrido de control y protección para una grúa portuaria de muelle tipo pórtico, con el objetivo de lograr un rendimiento de 30 contenedores por hora mientras se cumplen normas estrictas de operación y seguridad. Se implementaron controladores PID en tres niveles: Nivel 2 (control regulatorio), Nivel 1 (control supervisor) y Nivel 0 (control de seguridad), junto con una interfaz hombre-máquina (HMI) y su traducción a Codesys. Se alcanzó el rendimiento buscado y se demostró la robustez del sistema frente a diversas situaciones. A pesar de limitaciones de hardware, se demostró el funcionamiento del controlador en Codesys y se notó una leve mejora al implementar el control de oscilación angular. Se considera que se cumplieron los objetivos y se plantea el desafío futuro de optimizar el controlador una vez que se cuente con la planta real.

Índice

Resumen.....	2
1. Introducción.....	4
2. Desarrollo	5
2.1. Definición del problema.....	5
2.2. Modelado del Sistema Físico.....	5
2.2.1. Subsistema de Izaje	6
2.2.2. Subsistema de Traslación del Carro	8
2.2.3. Dinámica de la carga	10
2.2.4. Longitud del cable e inclinación	11
2.2.5. Modo de Twistlocks	12
2.2.6. Controladores Internos de Torque.....	13
2.2.7. Sensores.....	13
2.2.8. Superficie de apoyo vertical.....	15
2.2.9. Sistema Físico Completo	16
2.3. Nivel 2: Control Regulatorio.....	17
2.3.1. Controlador PID de movimiento de izaje	17
2.3.2. Controlador PID de movimiento de traslación de carro.....	19
2.3.3. Controlador automático de oscilación de carga.....	21
2.3.4. Control regulatorio completo.....	24
2.4. Nivel 1: Control Supervisor	24
2.4.1. Activador del Controlador de balanceo.....	24
2.4.2. Señal de Watchdog Timer	25
2.4.3. Estado del Spreader	25
2.4.4. Estimador de masa.....	26
2.4.5. Control de movimiento	27
2.4.6. Limitador de velocidad.....	31
2.4.7. Limitador de aceleración.....	32
2.5. Nivel 0: Seguridad	32
2.6. CODESYS	33
2.7. HMI	35
3. Resultados	37
3.1. Escaneo del perfil de obstáculos	37
3.2. Ciclo de operación Semi-Automática	37
3.3. Sensores y pulsadores.....	40
3.4. Resultados en CODESYS	46
4. Conclusiones	48
5. Referencias	49

1. Introducción

En el contexto del presente trabajo se desarrolla un sistema híbrido de control y protección para operación semiautomática coordinada en una grúa portuaria de muelle tipo pórtico. Se busca lograr un rendimiento de 30 contenedores movidos por hora, cumpliendo con limitaciones y especificaciones de operación y seguridad, demostrando robustez en la solución alcanzada. Se busca desarrollar el software de control en el entorno Codesys de forma que esté listo para ser cargado a un controlador real. Se busca también simular la planta en el entorno virtual de Simulink, para obtener una simulación lo más representativa de la realidad posible y de esta manera reducir los errores, peligros y potenciales pérdidas a la hora de afrontar las pruebas en el entorno real.

En cuanto a las secciones del presente informe se inicia planteando el problema y modelando el sistema físico en Simulink con el menor paso posible para reflejar su comportamiento continuo. Luego se desarrollan controladores PID discretos para los movimientos de izaje, de traslación y de oscilación angular de la carga que componen el control regulatorio, de aquí en adelante también denominado Nivel 2 del controlador de estados continuos muestrados en el tiempo. Posteriormente se desarrolla también el Nivel 1 de control supervisor, un autómata de estados discretos activados por eventos, y el Nivel 0 de Seguridad, que actúa en emergencias llevando al sistema a estados seguros. Estos últimos se desarrollan inicialmente en Stateflow.

Se implementa el controlador de Nivel 2, 1 y 0 en Codesys y se desarrolla una HMI para permitir al operario controlar los distintos elementos de la simulación.

Finalmente se analizan los resultados obtenidos y se elaboran conclusiones.

2. Desarrollo

2.1. Definición del problema

Partiendo de la Guía de Trabajo [1] se desea desarrollar un sistema híbrido de control y protección para una grúa portacontenedores portuaria de muelle tipo pórtico. El mismo debe incluir 3 niveles jerárquicos.

Nivel 2 - Control regulatorio: Estados continuos en tiempo discreto

Nivel 1 - Control supervisor: Autómata, estados discretos activados por eventos

Nivel 0 – Seguridad: En espera, actúa en emergencia llevando al sistema a estado seguro.

Se considera el control de operación semi-automática coordinada de dos movimientos principales: traslación horizontal de carro y traslación vertical de la carga. Ambos son impulsados mediante cables de acero desde mecanismos rotativos accionados por motores eléctricos en una casa de máquinas fija. Estos movimientos tienen restricciones de operación detallados en la guía de trabajo y están acoplados entre sí por la carga.

2.2. Modelado del Sistema Físico

El modelo del sistema físico simplificado con el que se trabajará responde a la Figura 2.1

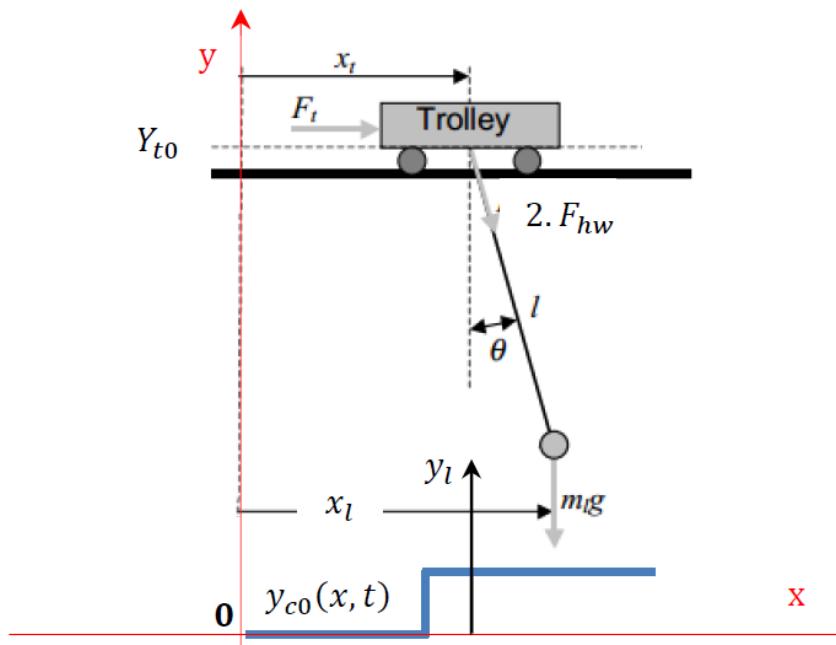


Figura 2.1 Modelo Físico simplificado del subsistema Carro-Cable-Carga y Perfil de obstáculos [1]

Las ecuaciones que determinan la relación geométrica entre las variables representadas en la Figura 2.1 Modelo Físico simplificado del subsistema Carro-Cable-Carga y Perfil de obstáculos [1] son:

$$x_l(t) = x_t(t) + l(t) \cdot \sin(\theta(t)) \quad (\text{Ec. 2.2.1})$$

$$y_l(t) = y_{t0} - l(t) \cdot \cos(\theta(t)) \quad (\text{Ec. 2.2.2})$$

Se procede a explicar cada componente del sistema físico y los modos de funcionamiento de este. Las ecuaciones que rigen la dinámica de los subsistemas siguientes se extraen de la Guía de Trabajo [1]

2.2.1. Subsistema de Izaje

Este subsistema está compuesto por el despliegue del cable abierto, el tambor, el freno de emergencia, la caja reductora, el motor y el freno de operación.

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_{t0} - l_h(t) \equiv x_h(t) \Rightarrow -\dot{l}_h(t) = \dot{x}_h(t) \equiv v_h(t); \\ 2. v_h(t) = r_{hd} \cdot \omega_{hd}(t); \quad F_{hw}(t) \cdot r_{hd} = T_{hdl}(t) \\ J_{hd+hEb} \cdot \dot{\omega}_{hd}(t) = T_{hd}(t) + T_{hEb}(t, (BRK_{hE})) - b_{hd} \cdot \omega_{hd}(t) - T_{hdl}(t); \quad \dot{\theta}_{hd}(t) \equiv \omega_{hd}(t) \\ \omega_{hd}(t) \cdot i_h = \omega_{hm}(t); \quad T_{hd}(t) = i_h \cdot T_{hml}(t); \\ J_{hm+hb} \cdot \dot{\omega}_{hm}(t) = T_{hm}(t) + T_{hb}(t, (BRK_h)) - b_{hm} \cdot \omega_{hm}(t) - T_{hml}(t); \quad \dot{\theta}_{hm}(t) \equiv \omega_{hm}(t) \end{array} \right. \begin{array}{l} (\text{Ec. 2.2.3}) \\ (\text{Ec. 2.2.4}) \\ (\text{Ec. 2.2.5}) \\ (\text{Ec. 2.2.6}) \\ (\text{Ec. 2.2.7}) \end{array}$$

Para modelar el mismo en Simulink se trabaja sobre las ecuaciones anteriores. Se busca relacionar la velocidad del tambor ω_{hd} a controlar, con los Torques de entrada.

Se reemplaza la relación de transmisión (Ec. 2.2.6)(1) en el balance de torques del motor (Ec. 2.2.7)(1) y se multiplica por i_h para reemplazar en esta misma la relación de transmisión (Ec. 2.2.6) (2)

$$i_h^2 \cdot J_{hm+hb} \cdot \dot{\omega}_{hd}(t) = i_h \cdot T_{hm}(t) + i_h \cdot T_{hb}(t, (BRK_h)) - i_h^2 \cdot b_{hm} \cdot \omega_{hd}(t) - T_{hd}(t)$$

Luego se suma esta ecuación con el balance de torques en el tambor (Ec. 2.2.5)(1) para eliminar $T_{hd}(t)$ y se reemplaza la tensión del cable (Ec. 2.2.4)(2) en la resultante

$$(i_h^2 \cdot J_{hm+hb} + J_{hd+hEb}) \cdot \dot{\omega}_{hd}(t) = i_h \cdot T_{hm}(t) + i_h \cdot T_{hb}(t, (BRK_h)) - (i_h^2 \cdot b_{hm} + b_{hd}) \cdot \omega_{hd}(t) + T_{hEb}(t, (BRK_{hE})) - r_{hd} \cdot F_{hw}(t)$$

Por otro lado, se despeja la velocidad angular del tambor de la (Ec. 2.2.4)(1) y se reemplaza en esta la velocidad de izaje (Ec. 2.2.3)(2) obteniendo

$$\omega_{hd}(t) = 2 \cdot \frac{v_h(t)}{r_{hd}} = -\frac{2}{r_{hd}} \cdot \dot{l}_h(t) \quad (\text{Ec. 2.2.8})$$

Reemplazando esta última en la ecuación anterior se obtiene:

$$J_{heq} \cdot \ddot{l}_h(t) + b_{heq} \cdot \dot{l}_h(t) = i_h \cdot T_{hm}(t) + i_h \cdot T_{hb}(t, (BRK_h)) + T_{hEb}(t, (BRK_{hE})) - r_{hd} \cdot F_{hw}(t) \quad (\text{Ec. 2.2.9})$$

Donde

$$J_{heq} = -\frac{2}{r_{hd}} \cdot (i_h^2 \cdot J_{hm+hb} + J_{hd+hEb}); \quad b_{heq} = -\frac{2}{r_{hd}} \cdot (i_h^2 \cdot b_{hm} + b_{hd})$$

Se obtiene la velocidad angular del motor de izaje a partir de $l_h(t)$ usando la (Ec. 2.2.8) y la (Ec. 2.2.6)(1):

$$\omega_{hm}(t) = -\frac{2 \cdot i_h}{r_{hd}} \cdot \dot{l}_h(t) \quad (\text{Ec. 2.2.10})$$

Por otro lado se obtienen las ecuaciones que representan al freno mecánico de operación y de emergencia para el izaje.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{hb}(t, (BRKh = Off)) = -b_{hb} \cdot \omega_{hm}(t), \text{saturado: } -T_{hb Max} < T_{hb}(t) < +T_{hb Max} \\ T_{hb}(t, (BRKh = On)) = 0 \text{ N.m} \\ T_{hEb}(t, (BRKhE = Off)) = -b_{hEb} \cdot \omega_{hd}(t), \text{saturado: } -T_{hEb Max} < T_{hEb}(t) < +T_{hEb Max} \\ T_{hEb}(t, (BRKhE = On)) = 0 \text{ N.m} \end{array} \right.$$

Reemplazando en las anteriores la (Ec. 2.2.8) y la (Ec. 2.2.10) se obtiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{hb}(t, (BRKh = Off)) = \frac{2 \cdot i_h \cdot b_{hb}}{r_{hd}} \cdot l_h(t), \text{saturado: } -T_{hb Max} < T_{hb}(t) < +T_{hb Max} \\ T_{hb}(t, (BRKh = On)) = 0 \text{ N.m} \\ T_{hEb}(t, (BRKhE = Off)) = \frac{2 \cdot b_{hEb}}{r_{hd}} \cdot l_h(t), \text{saturado: } -T_{hEb Max} < T_{hEb}(t) < +T_{hEb Max} \\ T_{hEb}(t, (BRKhE = On)) = 0 \text{ N.m} \end{array} \right.$$

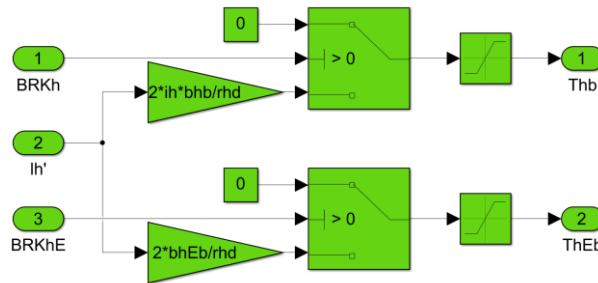


Figura 2.2 Modelo en Simulink de los frenos de izaje de operación y emergencia.

Se obtiene también la posición instantánea del eje motor para posterior medición como una salida del subsistema integrando la (Ec. 2.2.10) y considerando la (Ec. 2.2.3).

$$\theta_{hm}(t) = Y_{t0} - \frac{2 \cdot i_h}{r_{hd}} \cdot l_h(t)$$

Y el modelo de Simulink considerando el subsistema de frenos, la expresión anterior y la (Ec. 2.2.9)

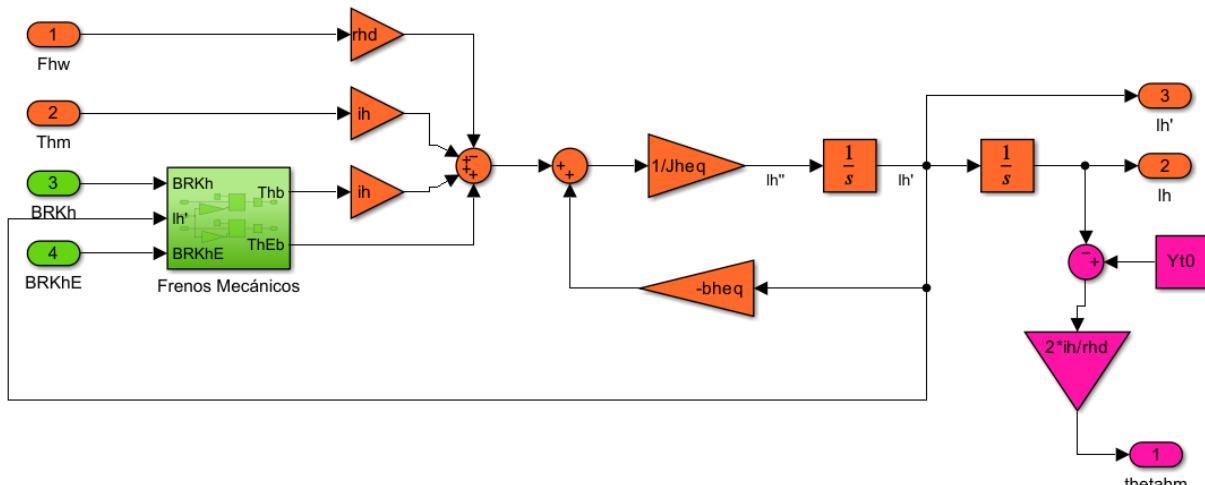


Figura 2.3 Modelo en Simulink del subsistema de izaje

Se obtiene también el modelo en Simulink a partir de las ecuaciones de la tensión de cable de izaje:

Para $l(t) \geq l_h(t)$:

$$F_{hw}(t) = K_w(l_h(t)) \cdot 2 \cdot (l(t) - l_h(t)) + b_w(l_h(t)) \cdot 2 \cdot (\dot{l}(t) - \dot{l}_h(t))$$

$$K_w(l_h(t)) = \frac{k_{wu}}{2 \cdot l_h(t) + 110 \text{ m}} \quad ; \quad b_w(l_h(t)) = b_{wu}(2 \cdot l_h(t) + 110 \text{ m})$$

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

$$F_{hw}(t) = 0 \text{ N}$$

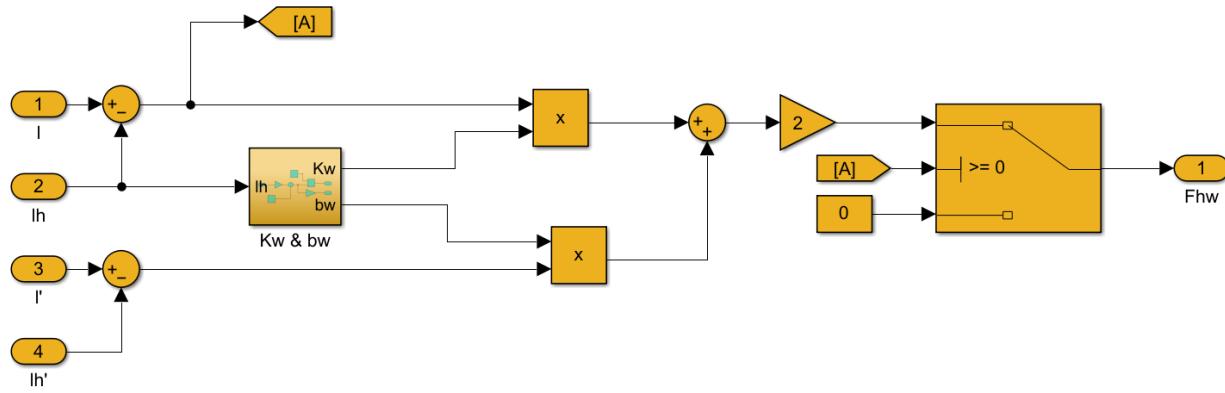


Figura 2.4 Modelo en Simulink de la tensión en el cable de izaje

En este esquema se contempla un caso de cable flojo, cuando la distancia entre la carga y el carro $l(t)$ es menor a la extensión del cable en reposo $l_h(t)$, y un caso de cable tensado cuando esto no se cumple, donde la fuerza de tensión responde a las ecuaciones mencionadas.

2.2.2. Subsistema de Traslación del Carro

Este subsistema está compuesto por el carro, el despliegue de cable cerrado, el tambor, la caja reductora, el motor y el freno de operación:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_t \cdot \dot{v}_t(t) = F_{tw}(t) - b_t \cdot v_t(t) + 2 \cdot F_{hw}(t) \cdot \sin \theta(t); \quad \dot{x}_t(t) \equiv v_t(t) \\ F_{tw}(t) = K_{tw} \cdot (x_{td}(t) - x_t(t)) + b_{tw} \cdot (v_{td}(t) - v_t(t)) \\ v_{td}(t) = r_{td} \cdot \omega_{td}(t); \quad F_{tw}(t) \cdot r_{td} = T_{tdl}(t); \quad \dot{x}_{td}(t) \equiv v_{td}(t) \\ J_{td} \cdot \dot{\omega}_{td}(t) = T_{td}(t) - b_{td} \cdot \omega_{td}(t) - T_{tdl}(t); \quad \dot{\theta}_{td}(t) \equiv \omega_{td}(t) \\ \omega_{td}(t) \cdot i_t = \omega_{tm}(t); \quad T_{td}(t) = i_t \cdot T_{tml}(t) \\ J_{tm+tb} \cdot \dot{\omega}_{tm}(t) = T_{tm}(t) + T_{tb}(t, BRK_t) - b_{tm} \cdot \omega_{tm}(t) - T_{tml}(t); \quad \dot{\theta}_{tm}(t) \equiv \omega_{tm}(t) \end{array} \right. \begin{array}{l} (\text{Ec. 2.2.11}) \\ (\text{Ec. 2.2.12}) \\ (\text{Ec. 2.2.13}) \\ (\text{Ec. 2.2.14}) \\ (\text{Ec. 2.2.15}) \\ (\text{Ec. 2.2.16}) \end{array}$$

Se reemplaza la relación de transmisión (Ec. 2.2.15) (1) en el balance de torques del motor (Ec. 2.2.16) (1) y se multiplica por i_t para reemplazar en esta misma la relación de transmisión (Ec. 2.2.15) (2)

$$J_{tm+tb} \cdot i_t^2 \cdot \dot{\omega}_{td}(t) = i_t \cdot T_{tm}(t) + i_t \cdot T_{tb}(t, BRK_t) - b_{tm} \cdot i_t^2 \cdot \omega_{td}(t) - T_{td}(t)$$

Luego se suma esta ecuación con el balance de torques en el tambor (Ec. 2.2.14)(1) para eliminar $T_{td}(t)$ y se reemplazan la tensión del cable (Ec. 2.2.13)(2), la velocidad tangencial de traslación (Ec. 2.2.13)(1) y su derivada (Ec. 2.2.13)(3) en la resultante

$$\frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \cdot \ddot{x}_{td}(t) + \frac{b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td}}{r_{td}} \cdot \dot{x}_{td}(t) = i_t \cdot T_{tm}(t) + i_t \cdot T_{tb}(t, BRK_t) - r_{td} \cdot F_{tw}(t)$$

A continuación se reemplaza la Fuerza de tensión del cable (Ec. 2.2.12) y se obtiene:

$$\frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \cdot \ddot{x}_{td}(t) + \frac{b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td} + b_{tw} \cdot r_{td}^2}{r_{td}} \cdot \dot{x}_{td}(t) + r_{td} \cdot K_{tw} \cdot x_{td}(t) = i_t \cdot T_{tm}(t) + i_t \cdot T_{tb}(t, BRK_t) + r_{td} \cdot K_{tw} \cdot x_t(t) + r_{td} \cdot b_{tw} \cdot \dot{x}_t(t)$$

Se define

$$J_{tdeq} = \frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}}$$

$$b_{tdeq} = \frac{b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td} + b_{tw} \cdot r_{td}^2}{r_{td}}$$

Y despejando \ddot{x}_{td} se obtiene:

$$\ddot{x}_{td}(t) = \frac{1}{J_{tdeq}} \cdot (-b_{tdeq} \cdot \dot{x}_{td}(t) - r_{td} \cdot K_{tw} \cdot x_{td}(t) + i_t \cdot T_{tm}(t) + i_t \cdot T_{tb}(t, BRK_t) + r_{td} \cdot K_{tw} \cdot x_t(t) + r_{td} \cdot b_{tw} \cdot \dot{x}_t(t))$$

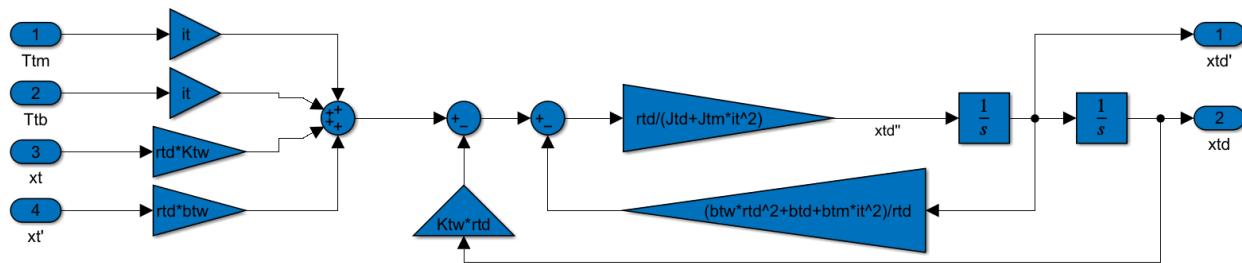


Figura 2.5 Modelo en Simulink de la dinámica del tambor

Por otro lado, reemplazando la tensión del cable (Ec. 2.2.12) y la derivada de la posición del carro (Ec. 2.2.11)(2) en la ecuación de movimiento del carro (Ec. 2.2.11)(1) se obtiene:

$$M_t \ddot{x}_t(t) = b_{tw} \dot{x}_{td}(t) - (b_{tw} + b_t) \dot{x}_t(t) + K_{tw} x_{td}(t) - K_{tw} x_t(t) + 2 F_{hw}(t) \sin \theta(t)$$

Que en Simulink resulta:

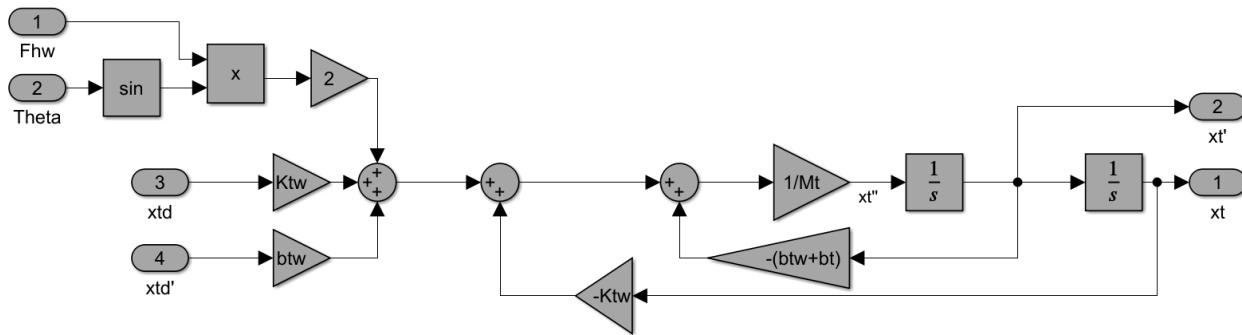


Figura 2.6 Modelo en Simulink del subsistema de carro

Estas últimas forman un sistema de ecuaciones acoplado:

$$\begin{cases} M_t \ddot{x}_t(t) = b_{tw} \dot{x}_{td}(t) - (b_{tw} + b_t) \dot{x}_t(t) + K_{tw} x_{td}(t) - K_{tw} x_t(t) + 2 F_{hw}(t) \sin \theta(t) \\ \ddot{x}_{td}(t) = \frac{1}{J_{td eq}} \cdot (-b_{td eq} \dot{x}_{td}(t) - r_{td} K_{tw} x_{td}(t) + i_t T_{tm}(t) + i_t T_{tb}(t, BRK_t) + r_{td} K_{tw} x_t(t) + r_{td} b_{tw} \dot{x}_t(t)) \\ J_{td eq} = \frac{J_{tm+tb} i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \quad ; \quad b_{td eq} = \frac{b_{tm} i_t^2 + b_{td} + b_{tw} r_{td}^2}{r_{td}} \end{cases}$$

Combinando (Ec. 2.2.13)(1), (Ec. 2.2.13)(3) y (Ec. 2.2.15)(1) y luego despejando $\omega_{tm}(t)$

$$\omega_{tm}(t) = \frac{i_t}{r_{td}} \cdot \dot{x}_{td}(t) \quad (Ec. 2.2.17)$$

$$\theta_{tm}(t) = \frac{i_t}{r_{td}} \cdot x_{td}(t) \quad (Ec. 2.2.18)$$

Se obtienen las ecuaciones del freno mecánico de operación del carro.

$$\begin{cases} T_{tb}(t, BRK_t = \text{Off}) = -b_{tb} \omega_{tm}(t), \text{saturado: } -T_{tb Max} < T_{tb}(t) < +T_{tb Max} \\ T_{tb}(t, BRK_t = \text{On}) = 0 \text{ N.m} \end{cases}$$

Que combinado con la (Ec. 2.2.17) nos dan:

$$\begin{cases} T_{tb}(t, BRK_t = \text{Off}) = -\frac{b_{tb} i_t}{r_{td}} \cdot \dot{x}_{td}(t), \text{saturado: } -T_{tb Max} < T_{tb}(t) < +T_{tb Max} \\ T_{tb}(t, BRK_t = \text{On}) = 0 \text{ N.m} \end{cases}$$

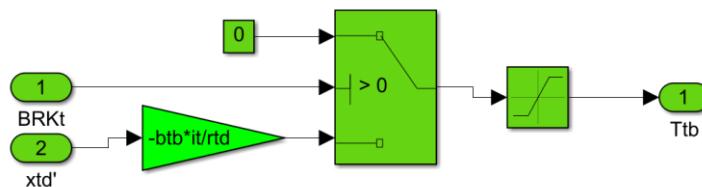


Figura 2.7 Modelo en Simulink del freno de operación de traslación

Y finalmente, incluyendo la (Ec. 2.2.18) se obtiene el subsistema de traslación completo en Simulink:

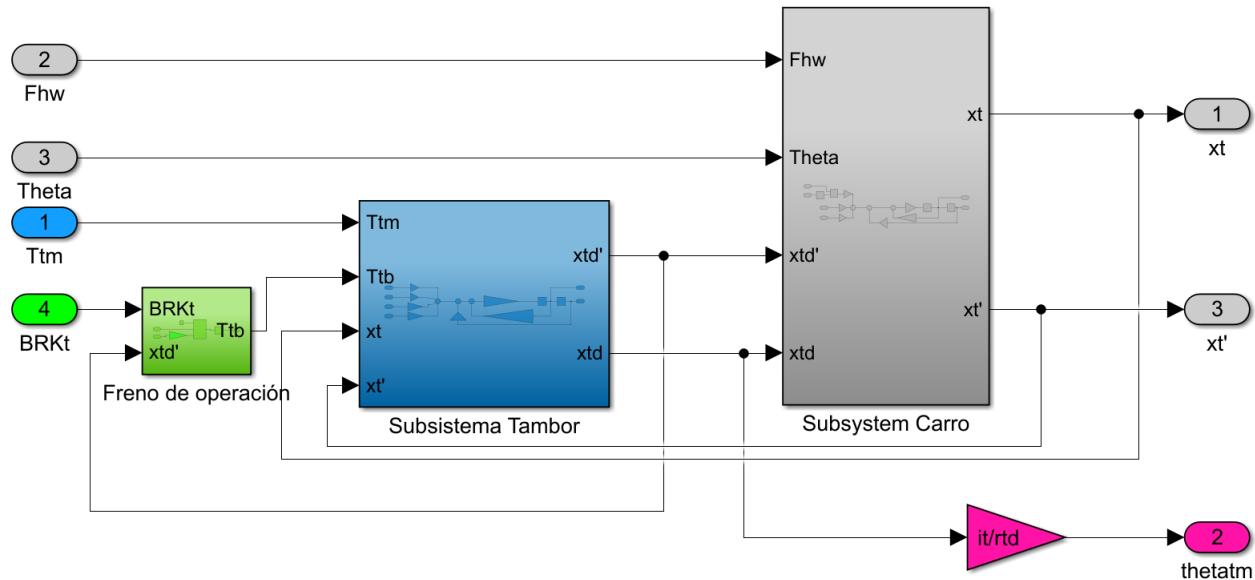


Figura 2.8 Modelo en Simulink del susbsistema de traslación completo

2.2.3. Dinámica de la carga

Según si la carga se encuentra apoyada o suspendida de los cables se presentan distintos comportamientos en la dinámica de la carga. Estos responden a las siguientes ecuaciones, en las cuales se reemplazan las relaciones $\dot{x}_l(t) \equiv v_{xl}(t)$ y $\dot{y}_l(t) \equiv v_{yl}(t)$.

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ Caso 1) Carga suspendida} \Leftrightarrow y_l(t) - h_c(\text{TLK}) > y_{c0}(x, t) \\ m_l(\text{TLK}).\ddot{x}_l(t) = -2.F_{hw}(t).\sin \theta(t) \end{array} \right\} (\text{Ec. 2.2.19})$$

$$m_l(\text{TLK}).\ddot{y}_l(t) = 2.F_{hw}(t).\cos \theta(t) - m_l(\text{TLK}).g \quad (\text{Ec. 2.2.20})$$

$$\left. \begin{array}{l} \bullet \text{ Caso 2) Carga apoyada} \Leftrightarrow y_l(t) - h_c(\text{TLK}) \leq y_{c0}(x, t) \\ m_l(\text{TLK}).\ddot{x}_l(t) = -2.F_{hw}(t).\sin \theta(t) - b_{cx}.\dot{x}_l(t) \end{array} \right\} (\text{Ec. 2.2.21})$$

$$m_l(\text{TLK}).\ddot{y}_l(t) = 2.F_{hw}(t).\cos \theta(t) - m_l(\text{TLK}).g + K_{cy}.(y_{c0}(x, t) - (y_l(t) - h_c(\text{TLK}))) - b_{cy}.\dot{y}_l(t) \quad (\text{Ec. 2.2.22})$$

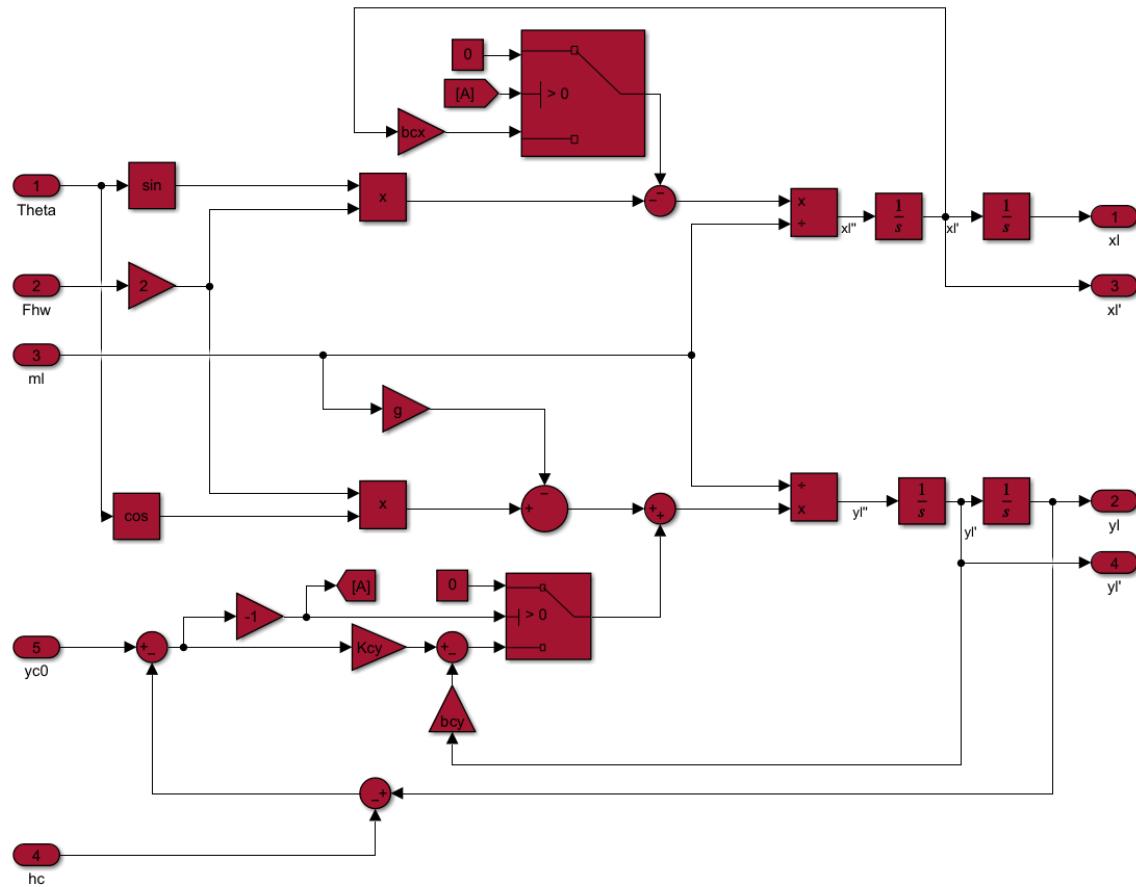


Figura 2.9 Modelo en Simulink del modo de contacto de la carga

2.2.4. Longitud del cable e inclinación

De acuerdo con la posición del carro y del spreader, se puede obtener la longitud real entre los mismos $l(t)$, y la inclinación necesaria $\theta(t)$, que determinará si el cable se encuentra tensado o flojo. Las ecuaciones que rigen este comportamiento son:

$$\left\{ \begin{array}{l} l(t) = \sqrt{(x_l(t) - x_t(t))^2 + (y_l(t) - y_t(t))^2} \\ \theta(t) = tg^{-1} \left(\frac{x_l(t) - x_t(t)}{y_l(t) - y_t(t)} \right) \end{array} \right. \quad (Ec. 2.2.23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} l(t) = \sqrt{(x_l(t) - x_t(t))^2 + (y_l(t) - y_t(t))^2} \\ \theta(t) = tg^{-1} \left(\frac{x_l(t) - x_t(t)}{y_l(t) - y_t(t)} \right) \end{array} \right. \quad (Ec. 2.2.24)$$

Se deriva la ecuación de longitud del cable para obtener $\dot{l}(t)$:

$$\dot{l}(t) = \frac{1}{2 \cdot l(t)} \cdot (2 \cdot (x_l(t) - x_t(t))(\dot{x}_l(t) - \dot{x}_t(t)) + 2 \cdot (y_l(t) - y_t(t))(-\dot{y}_l(t)))$$

$$\dot{l}(t) = \frac{(x_l(t) - x_t(t))(\dot{x}_l(t) - \dot{x}_t(t)) - (y_l(t) - y_t(t)) \cdot \dot{y}_l(t)}{l(t)}$$

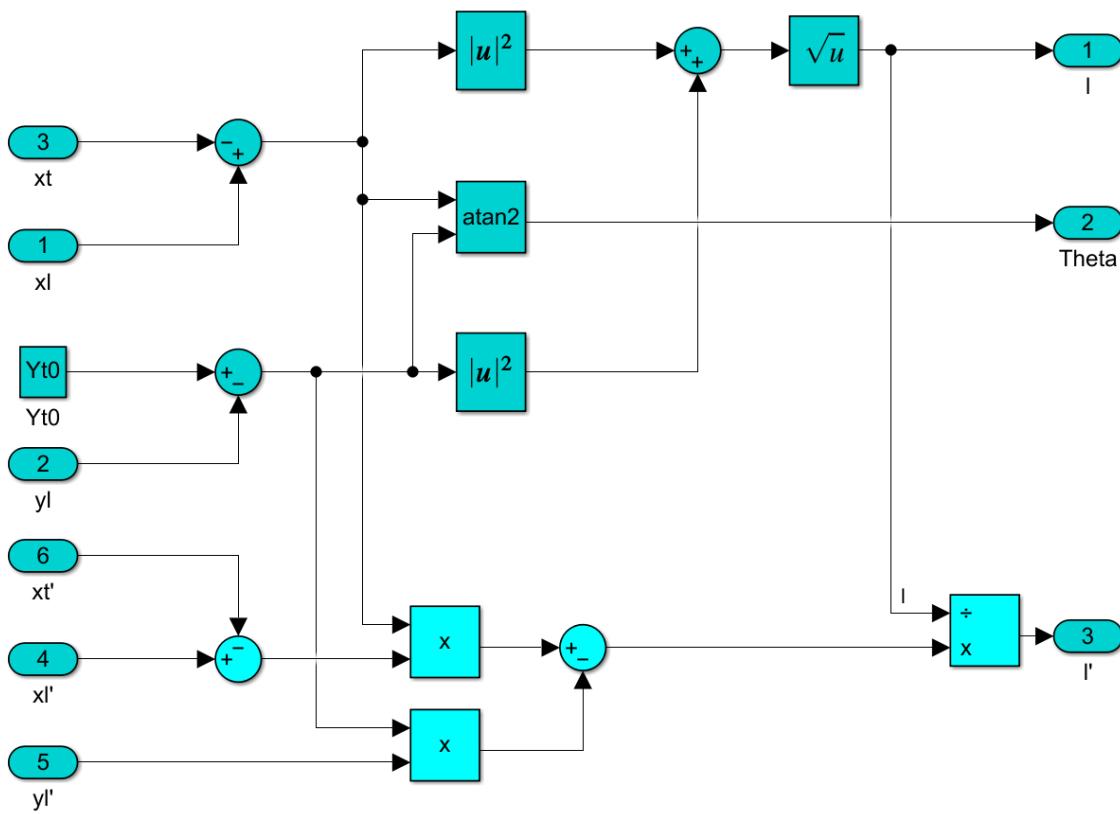


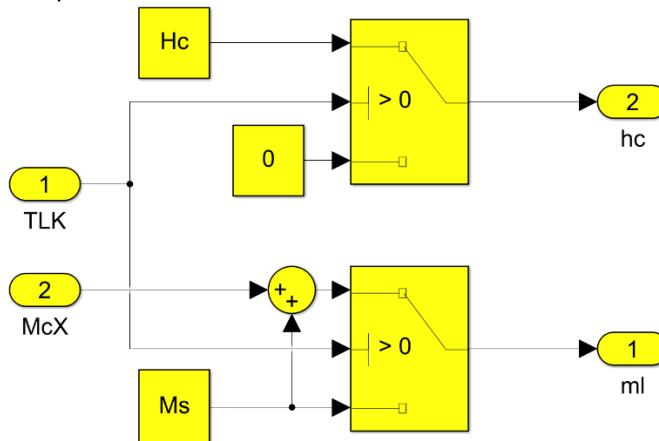
Figura 2.10 Modelo en Simulink de las restricciones geométricas

2.2.5. Modo de Twistlocks

Según el estado de los Twistlocks, el spreader se encuentra o no cargado, afectando a la masa de carga del sistema y a la altura inferior de este. Las ecuaciones resultan:

$$\begin{cases} h_c(TLK = \text{Off}) = 0 \text{ m} \\ m_l(TLK = \text{Off}) = M_s \\ h_c(TLK = \text{On}) = H_c \\ m_l(TLK = \text{On}) = M_s + M_{cX}, \end{cases} \quad M_{c_min} \leq M_{cX} \leq M_{c_max} \text{ (variable según carga)}$$

El modelo en Simulink correspondiente es:



2.2.6. Controladores Internos de Torque

Tanto el motor de accionamiento del carro como el motor de accionamiento de izaje cuentan con un controlador interno de torque que, dada una consigna de torque deseado, ajusta su comportamiento para cumplirla. La respuesta se modela como un modulador de torque idealizado equivalente de 1º orden LTI con limitador de torque máximo para protección del motor. Las ecuaciones que reflejan este comportamiento:

$$\begin{cases} \tau_{hm} \cdot \dot{T}_{hm}(t) = T_{hm}^*(t) - T_{hm}(t) \\ T_{hm}^*(t) = \min(+T_{hm\ Max}, \max(-T_{hm\ Max}, T_{hm}^*(k \cdot T_{s2}))) \\ \tau_{tm} \cdot \dot{T}_{tm}(t) = T_{tm}^*(t) - T_{tm}(t) \\ T_{tm}^*(t) = \min(+T_{tm\ Max}, \max(-T_{tm\ Max}, T_{tm}^*(k \cdot T_{s2}))) \end{cases}$$

A partir de las mismas se obtienen los modelos correspondientes en Simulink:

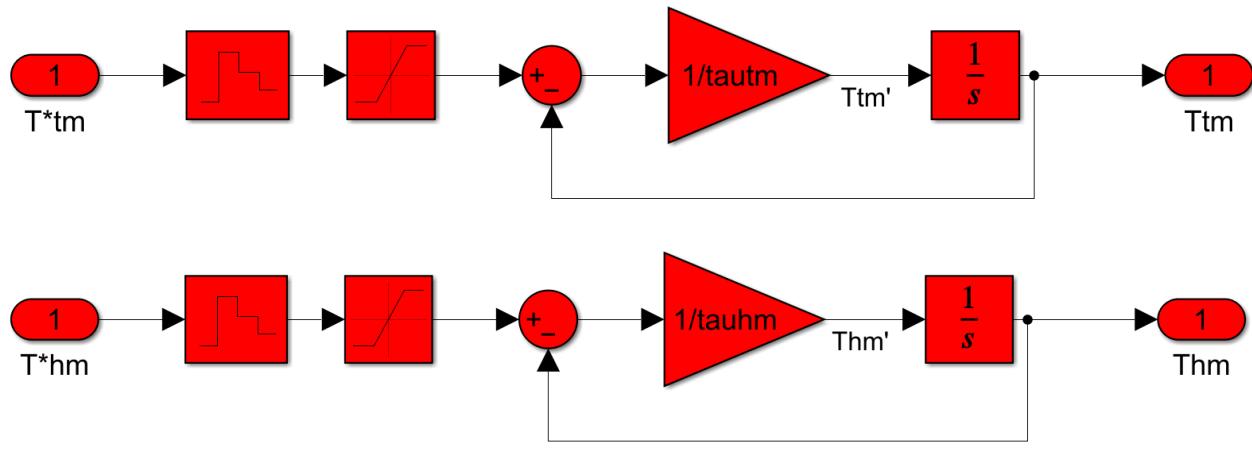


Figura 2.11 Modelo en Simulink del modulador de torque idealizado del motor de traslación y del de izaje

2.2.7. Sensores

El sistema cuenta con los siguientes sensores, de acuerdo a lo consignado en la sección de “Configuración e Hipótesis Simplificativas” de la Guía de Trabajo [1]:

- a. Encoder de posición instantánea en eje de cada motor (carro e izaje).

Se modelan como ganancias unitarias en Simulink, sobre la variable de medición.

- b. Celda de carga en headblock para medir la tensión instantánea del cable de izaje.

Se modela como una ganancia unitaria en Simulink, sobre la variable de medición.

- c. Sensor (cámara CCD) para medir el ángulo vertical instantáneo entre la carga y el carro.

Se modela como una ganancia unitaria en Simulink, sobre la variable de medición.

- d. Sensor de distancia láser en la base del carro para realizar escaneo del perfil de obstáculos.

Se modela como una ganancia unitaria en Simulink, sobre la variable de medición.

- e. Detector de sobrevelocidad 115% de velocidad máxima en izaje.

El valor de la velocidad máxima de izaje, y por ende el de sobrevelocidad, depende de la masa estimada. El modelo en Simulink considerando la equivalencia de la (Ec. 2.2.3)(2) se encuentra a continuación y está basado en la “Figura 5: Característica de Potencia Constante” de la Guía de trabajo [1].

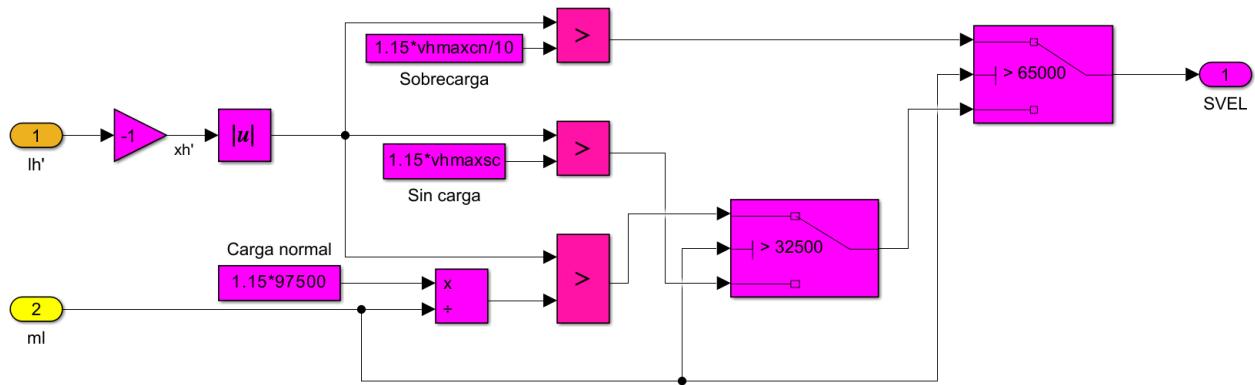


Figura 2.12 Modelo en Simulink del sensor de sobrevelocidad

- f. Fines de carrera (limit switches) de operación (límites normales) y de emergencia (límites últimos, separados 1 m adicional al límite normal), en cada extremo de carro, fijos en viga; y para izaje, rotativos en tambor.

El modelo de Simulink para los fines de carrera de operación y de emergencia de **carro** debe chequear simplemente si la variable ha excedido los valores correspondientes. Estos se extraen de la sección de “Límites operativos de movimiento” de la Guía de Trabajo [1] y corresponden a -30m (sobre muelle) y 50m (sobre barco).

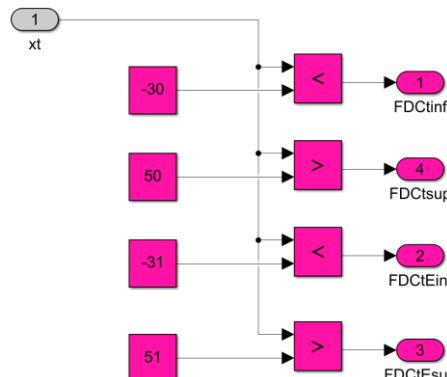


Figura 2.13 Modelo en Simulink de fines de carrera de traslación

En cuanto al modelo de Simulink para los fines de carrera de operación y de emergencia de **izaje** se utiliza la (Ec. 2.2.3)(1) para obtener la altura de izaje a la que se le han asignado los valores límite a partir de las salidas del sistema físico. Los límites se extraen de la sección de “Límites operativos de movimiento” de la Guía de Trabajo [1] y corresponden a -20m (Dentro de barco) y 40m (sobre barco/muelle).

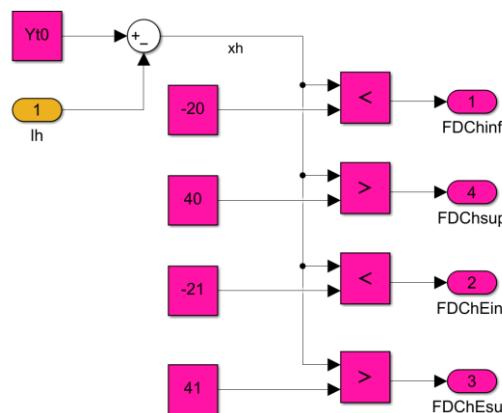


Figura 2.14 Modelo en Simulink de fines de carrera de izaje

Y finalmente el subsistema completo de sensores

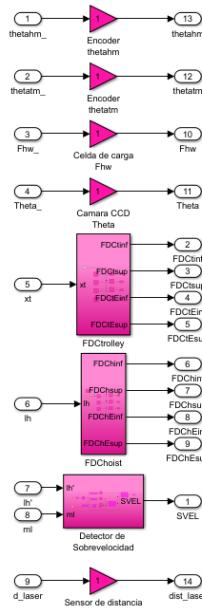


Figura 2.15 Modelo en Simulink de los sensores del sistema

2.2.8. Superficie de apoyo vertical

Una de las influencias del ambiente sobre nuestro sistema es la disposición de contenedores y obstáculos, limitando las trayectorias que la grúa puede recorrer. Para conocer este perfil desde el controlador se realiza una primera etapa de reconocimiento con un sensor láser en la base del Spreader, recorriendo horizontalmente la zona de trabajo. El perfil de obstáculos se modela en la planta en base al siguiente bloque de función, del cual también se extrae la variable a medir de la distancia encontrada por el sensor láser.

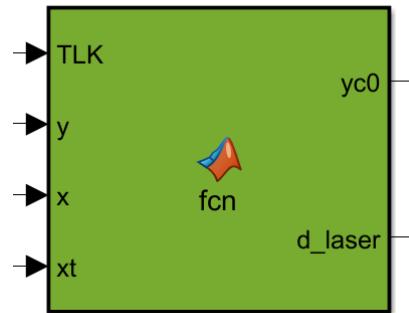


Figura 2.16 Modelo en Simulink de la función encargada de modelar el contorno del muelle y barco

El mismo se encarga de devolver el valor en el eje y de los obstáculos correspondiente a la coordenada xl en la que el Spreader se encuentre. También edita el ambiente en la posición xl cuando se activan o desactivan los TLK, indicando la toma o deposición de un nuevo contenedor en la posición correspondiente.

2.2.9. Sistema Físico Completo

Combinando todos los subsistemas anteriores se obtiene el modelo de Simulink de la Planta:

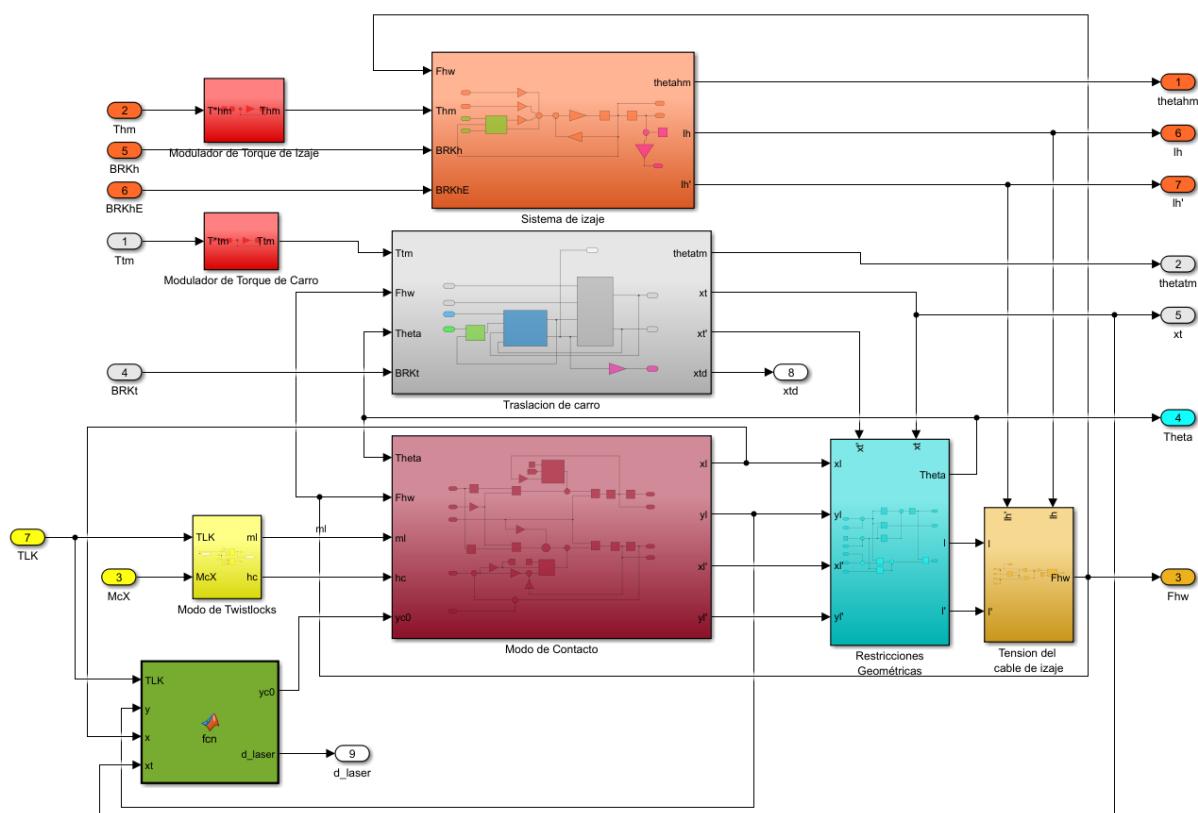


Figura 2.17 Modelo en Simulink de la planta física completa

2.3. Nivel 2: Control Regulatorio

El Nivel 2 es un controlador de movimiento de estados continuos en tiempo discretizado, que recibe consignas del control supervisor para cada movimiento de izaje y traslación. Además, incorpora un control optativo de balanceo de la carga, para posteriores pruebas de rendimiento del sistema.

2.3.1. Controlador PID de movimiento de izaje

Se reemplaza en la ecuación general de izaje (Ec. 2.2.9) la (Ec. 2.2.3) y se asume que el controlador interno de torque en accionamientos es lo suficientemente rápido para sustituir $T_{hm}(t) = T_{hm}^*(t)$ quedando:

$$-J_{heq} \ddot{x}_h(t) - b_{heq} \dot{x}_h(t) = i_h \cdot T_{hm}^*(t) + i_h \cdot T_{hb}(t, (BRK_h)) + T_{hEb}(t, (BRK_{hE})) - r_{hd} \cdot F_{hw}(t) \quad (\text{Ec. 2.3.1})$$

Despejando la (Ec. 2.2.20):

$$F_{hw}(t) = m_l(\text{TLK}) \cdot \frac{(\ddot{y}_l(t) + g)}{2 \cdot \cos \theta(t)}$$

Luego asumiendo que se trabajará con $\theta(t)$ pequeños se transforma en:

$$F_{hw}(t) = m_l(\text{TLK}) \cdot \frac{(\ddot{x}_h(t) + g)}{2}$$

Se reemplaza la ecuación anterior en la (Ec. 2.3.1), y considerando que el bucle de control no funcionará durante ningún frenado, se desprecian esos términos y se obtiene:

$$-J_{heq} \ddot{x}_h(t) - b_{heq} \dot{x}_h(t) = i_h \cdot T_{hm}^*(t) - r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot \frac{(\ddot{x}_h(t) + g)}{2}$$

Que reacomodando es:

$$(r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}) \ddot{x}_h(t) - b_{heq} \dot{x}_h(t) = i_h \cdot T_{hm}^*(t) - r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot \frac{g}{2} \quad (\text{Ec. 2.3.2})$$

Aplicando transformada de Laplace se obtiene la ecuación característica del sistema:

$$(r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}) \cdot s^2 X_h(s) - b_{heq} \cdot s \cdot X_h(s) = i_h \cdot T_{hm}^*(s) - r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot \frac{g}{2s}$$

$$\frac{X_h(s)}{T_{hm}^*(s)} = \frac{-i_h}{s \cdot ((J_{heq} - r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK})) \cdot s + b_{heq})}$$

Por lo tanto, los polos obtenidos, teniendo en cuenta las relaciones

$$J_{heq} = -\frac{2}{r_{hd}} \cdot (i_h^2 \cdot J_{hm+hb} + J_{hd+hEb}) \quad ; \quad b_{heq} = -\frac{2}{r_{hd}} \cdot (i_h^2 \cdot b_{hm} + b_{hd})$$

son:

$$p_{1h} = 0 \quad ; \quad p_{2h} = -\frac{b_{heq}}{J_{heq} - r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK})} = -\frac{i_h^2 \cdot b_{hm} + b_{hd}}{i_h^2 \cdot J_{hm+hb} + J_{hd+hEb} + r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK})} = -0,2949 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Para el cálculo del polo anterior se toma la masa de carga sin container, ya que será el polo más rápido posible, y por ende se busca una velocidad del controlador por encima de este.

A partir de la (Ec. 2.3.2) se diseña un controlador PID que defina la nueva consigna de torque en función del error de posición:

$$e_{xh}(t) = x_h^*(t) - x_h(t)$$

$$T_{hm}^*(t) = K_{Ph} \cdot e_{xh}(t) + K_{Ih} \cdot \int e_{xh}(t) dt + K_{Dh} \cdot \frac{de_{xh}(t)}{dt}$$

Luego

$$\ddot{x}_h(t) = (i_h \cdot \left(K_{Ph} \cdot e_{xh}(t) + K_{Ih} \cdot \int e_{xh}(t) dt + K_{Dh} \cdot \frac{de_{xh}(t)}{dt} \right) - r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot \frac{g}{2} + b_{heq} \cdot \dot{x}_h(t)) / (r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq})$$

Que transformando al plano s

$$s^2 \cdot X_h(s) = \frac{1}{r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}} \cdot \left(i_h \cdot (X_h^*(s) - X_h(s)) \cdot \left(\frac{K_{Ih}}{s} + K_{Ph} + K_{Dh} \cdot s \right) - r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot \frac{g}{2} + b_{heq} \cdot s \cdot X_h(s) \right)$$

Reagrupando:

$$X_h(s) \left((r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}) \cdot s^3 + (i_h \cdot K_{Dh} - b_{heq}) \cdot s^2 + i_h \cdot K_{Ph} \cdot s + i_h \cdot K_{Ih} \right) = X_h^*(s) \cdot (i_h \cdot K_{Dh} \cdot s^2 + i_h \cdot K_{Ph} \cdot s + i_h \cdot K_{Ih}) - r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot \frac{g}{2} \cdot s$$

$$\frac{X_h(s)}{X_h^*(s)} = \frac{i_h \cdot K_{Dh} \cdot s^2 + i_h \cdot K_{Ph} \cdot s + i_h \cdot K_{Ih}}{(r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}) \cdot s^3 + (i_h \cdot K_{Dh} - b_{heq}) \cdot s^2 + i_h \cdot K_{Ph} \cdot s + i_h \cdot K_{Ih}}$$

Para hallar sus constantes K_{Ph}, K_{Ih}, K_{Dh} se aplica el método de sintonía serie con $n_h = 3$ (crítico) y

$\omega_{posh} = 15 \cdot p_{2h}$. Luego se iguala la ecuación característica de la respuesta de la posición de izaje respecto a la consigna con la ecuación característica deseada, por lo que queda:

$$(r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}) \cdot s^3 + (i_h \cdot K_{Dh} - b_{heq}) \cdot s^2 + i_h \cdot K_{Ph} \cdot s + i_h \cdot K_{Ih} = (r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}) \cdot (s^3 + n_h \cdot \omega_{posh} \cdot s^2 + n_h \cdot \omega_{posh}^2 \cdot s + \omega_{posh}^3)$$

Luego

$$\frac{(i_h \cdot K_{Dh} - b_{heq})}{(r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq})} = n_h \cdot \omega_{posh}$$

$$\frac{i_h \cdot K_{Ph}}{(r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq})} = n_h \cdot \omega_{posh}^2$$

$$\frac{i_h \cdot K_{Ih}}{(r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq})} = \omega_{posh}^3$$

Y finalmente

$$K_{Dh} = \frac{((r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}) \cdot n_h \cdot \omega_{posh} + b_{heq})}{i_h}$$

$$K_{Ph} = (r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}) \cdot \frac{n_h \cdot \omega_{posh}^2}{i_h}$$

$$K_{Ih} = (r_{hd} \cdot m_l(\text{TLK}) - J_{heq}) \cdot \frac{\omega_{posh}^3}{i_h}$$

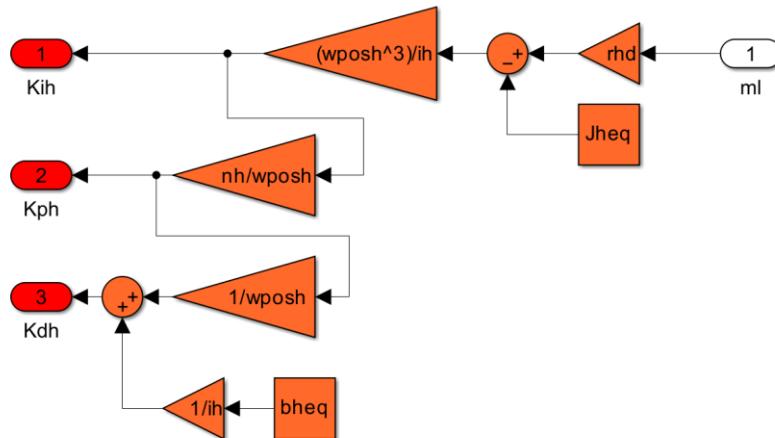


Figura 2.18 Modelo en Simulink del cálculo de los K del PID de izaje

Dado que el controlador debe ser discreto analizamos aproximaciones de las acciones integral y derivativa.

En cuanto a la acción integral utilizando la aproximación de Euler explícito la regla de actualización resulta

$$u_i(t_k) = K_{Ih} \cdot I_e(t_k)$$

$$I_e(t_k) \approx I_e(t_{k-1}) + T_{S2} \cdot e_{xh}(t_{k-1})$$

La acción derivativa por cociente incremental de primer orden hacia atrás resulta:

$$u_d(t_k) \approx \frac{K_{Dh}}{T_{S2}} \cdot (e_{xh}(t_k) - e_{xh}(t_{k-1}))$$

Para evitar errores numéricos al implementar este controlador en Codesys más adelante, es que se decide adaptar el PID discreto planteado para recibir como entradas $\dot{x}_h(t)$ y $\dot{x}_h^*(t)$ resultando en la siguiente gráfica.

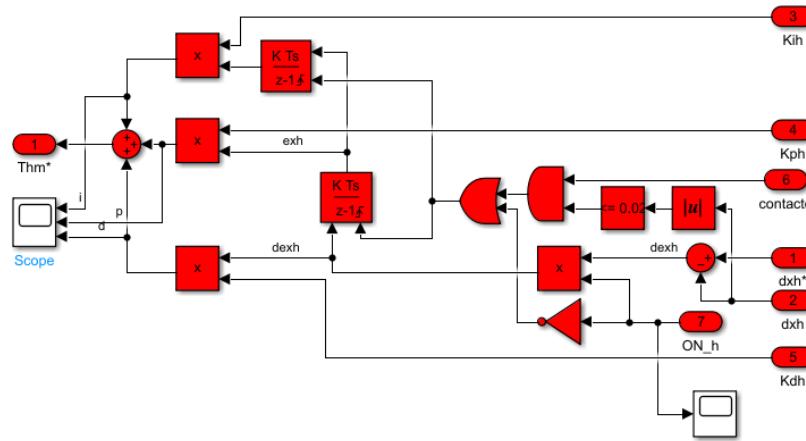


Figura 2.19 Modelo en Simulink del PID de izaje

Y finalmente el controlador de izaje completo resulta:

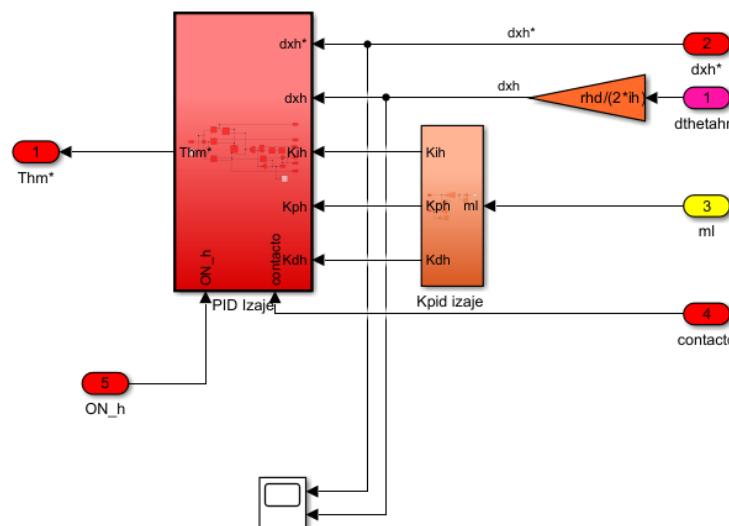


Figura 2.20 Modelo en Simulink del controlador de izaje completo

2.3.2. Controlador PID de movimiento de traslación de carro

Se busca obtener un controlador de movimiento de traslación de carro, sistema regido por las siguientes ecuaciones extraídas de la sección 2.2.2

$$\frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \cdot \ddot{x}_{td}(t) + \frac{b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td} + b_{tw} \cdot r_{td}^2}{r_{td}} \cdot \dot{x}_{td}(t) + r_{td} \cdot K_{tw} \cdot x_{td}(t) = i_t \cdot T_{tm}(t) + i_t \cdot T_{tb}(t, (BRK_t)) + r_{td} \cdot K_{tw} \cdot x_t(t) + r_{td} \cdot b_{tw} \cdot \dot{x}_t(t)$$

$$M_t \cdot \ddot{x}_t(t) = b_{tw} \cdot \dot{x}_{td}(t) - (b_{tw} + b_t) \dot{x}_t(t) + K_{tw} \cdot x_{td}(t) - K_{tw} \cdot x_t(t) + 2 \cdot F_{hw}(t) \cdot \sin \theta(t)$$

Una versión simplificada del sistema anterior se obtiene asumiendo rigidez infinita en el cable de acero que une el carro con el tambor del subsistema. De esta manera: $x_t(t) = x_{td}(t)$, igualándose también sus derivadas. Al sumar las ecuaciones anteriores y reagrupar:

$$\left(M_t + \frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \right) \cdot \ddot{x}_{td}(t) = -(b_t + \frac{b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td}}{r_{td}}) \cdot \dot{x}_{td}(t) + 2 \cdot F_{hw}(t) \cdot \sin \theta(t) + i_t \cdot T_{tm}(t) + i_t \cdot T_{tb}(t, (BRK_t))$$

Se considera que el bucle de control no funcionará durante el frenado, y se asume que el controlador interno de torque en accionamientos es lo suficientemente rápido para sustituir $T_{tm}(t) = T_{tm}^*(t)$ quedando:

$$\left(M_t + \frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \right) \cdot \ddot{x}_{td}(t) = -(b_t + \frac{b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td}}{r_{td}}) \cdot \dot{x}_{td}(t) + 2 \cdot F_{hw}(t) \cdot \sin \theta(t) + i_t \cdot T_{tm}^*(t) \quad (Ec. 2.3.3)$$

A partir de esta versión simplificada del sistema, se obtienen los polos que dan la velocidad del mismo. Se calcula la transformada de Laplace considerando $F_{hw}(t)$ una perturbación, y por ende llevándola a 0:

$$\left(M_t + \frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \right) \cdot s^2 \cdot X_{td}(s) + \left(b_t + \frac{b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td}}{r_{td}} \right) \cdot s \cdot X_{td}(s) = i_t \cdot T_{tm}^*(s)$$

Reagrupando se obtiene

$$\frac{X_{td}(s)}{T_{tm}^*(s)} = \frac{i_t}{s \cdot \left(M_t + \frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \right) s + \left(b_t + \frac{b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td}}{r_{td}} \right)} \quad (Ec. 2.3.4)$$

Y los polos del sistema se encuentran en

$$p_{2t} = -\frac{b_t \cdot r_{td} + b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td}}{M_t \cdot r_{td} + J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}} = -0,2421 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Para simplificar el cálculo de las constantes del PID se reemplaza la siguiente consigna interna.

$$T_{tm}^*(t) = \frac{1}{i_t} \cdot \left(M_t + \frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \right) \cdot T_{tm}'(t)$$

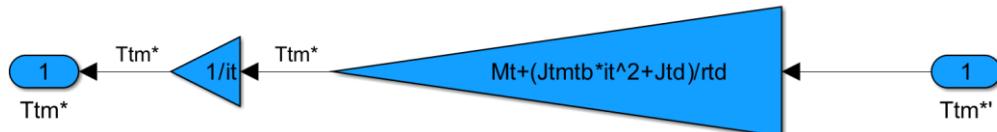


Figura 2.21 Modelo en Simulink de desacoplamientos de carro

Se diseña un controlador PID que defina la nueva consigna de torque en función del error de posición:
 $e_{xt}(t) = x_{td}^*(t) - x_{td}(t)$

$$T_{tm}^{**}(t) = K_{Pt}.e_{xt}(t) + K_{It}.\int e_{xt}(t)dt + K_{Dt}.\frac{de_{xt}(t)}{dt}$$

Por el método de sintonía de polos, para obtener un $\omega_{pos_t} = 15 \cdot p_{2t}$ y un $n_t = 3$ (amortiguamiento crítico) se desarrolla de forma análoga al controlador de la sección anterior y se obtienen las siguientes constantes.

$$K_{Dt} = \mathbf{n}_t \cdot \boldsymbol{\omega}_{pos\ t}$$

$$K_{Pt} = n_t \cdot \omega_{pos_t}^2$$

$$K_{It} = \omega_{pos\;t}^3$$

Y análogamente a la sección anterior, el PID discretizado resulta:

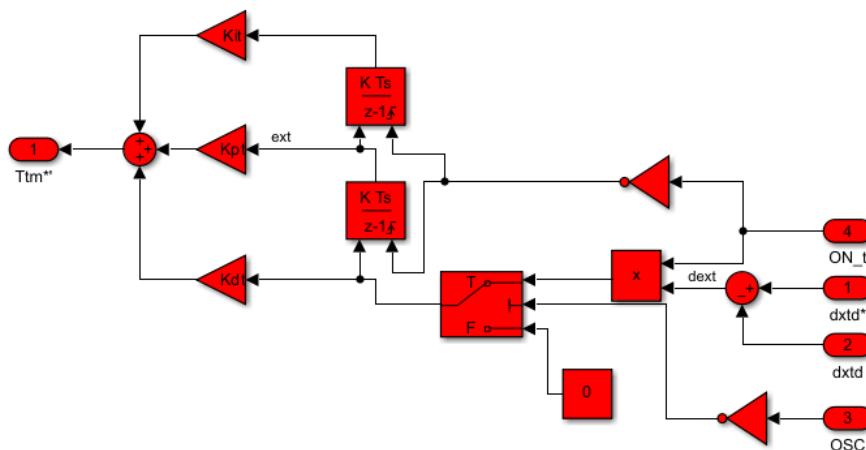


Figura 2.22 Modelo en Simulink del PID de translación

Y el controlador de translación completo resulta:

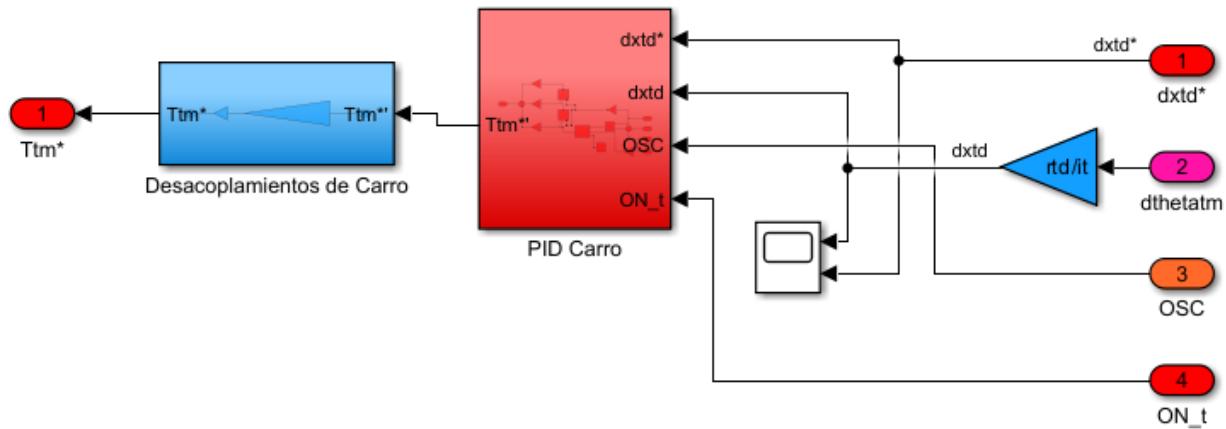


Figura 2.23 Modelo en Simulink del controlador de translación del carro

2.3.3. Controlador automático de oscilación de carga

Dentro de los requisitos técnicos que debe cubrir la solución, se encuentran también limitaciones al ángulo entre el carro y la carga durante sus distintas etapas de desplazamiento.

Para lograr ajustarse a estas se desarrolla un control PID con ganancias programadas, debido a la necesidad de adaptar las ganancias según la longitud del péndulo para alcanzar el control deseado sobre el ángulo $\theta(t)$.

Para el desarrollo del controlador se parte de las ecuaciones (Ec. 2.2.1) y (Ec. 2.2.2):

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

$$y_l(t) = Y_{t0} - l(t).\cos(\theta(t))$$

Se busca realizar una aproximación lineal del modelo, por lo que se consideran pequeñas variaciones alrededor de puntos de operación. Cada variable $z(t)$ se reemplaza por $z_o(t) + \Delta z(t)$ donde $z_o(t)$ (punto de operación) es una magnitud cuasi-estacionaria de variación lenta, y $\Delta z(t)$ una magnitud dinámica de variación rápida en el tiempo.

$$x_t(t) = x_{t_0}(t) + \Delta x_t(t); \quad l(t) = l_{t_0}(t) + \Delta l(t); \quad \theta(t) = \theta_{t_0}(t) + \Delta \theta(t)$$

$$x_l(t) = x_{lo}(t) + \Delta x_l(t); \quad y_l(t) = y_{lo}(t) + \Delta y_l(t)$$

Y además

$$x_{l_0}(t) = x_{t_0}(t) + l_0(t) \cdot \sin(\theta_0(t)) \quad ; \quad y_{l_0}(t) = Y_{t_0} - l_0(t) \cdot \cos(\theta_0(t))$$

Luego, realizando la expansión de Taylor de primer orden, la ecuación (Ec. 2.2.1) se puede aproximar como:

$$x_l(x_t(t), l(t), \theta(t)) = x_l(x_{t_0}(t) + \Delta x_t(t), l_0(t) + \Delta l(t), \theta_0(t) + \Delta \theta(t))$$

$$x_l(x_t(t), l(t), \theta(t)) = x_{lo}(t) + \left. \frac{\partial x_l(t)}{\partial x_t} \right|_o . \Delta x_t(t) + \left. \frac{\partial x_l(t)}{\partial l} \right|_o . \Delta l(t) + \left. \frac{\partial x_l(t)}{\partial \theta} \right|_o . \Delta \theta(t)$$

$$x_l(t) = x_{l_0}(t) + \Delta x_t(t) + \sin(\theta_\rho(t)) \cdot \Delta l(t) + l_\rho(t) \cdot \cos(\theta_\rho(t)) \cdot \Delta \theta(t) \quad (\text{Ec. 2.3.5})$$

Y análogamente la (Ec. 2.2.2) se puede expresar como:

$$y_l(l(t), \theta(t)) = y_l(l_o(t) + \Delta l(t), \theta_o(t) + \Delta \theta(t)) = y_{lo}(t) + \frac{\partial y_l(t)}{\partial l} \Big|_o \cdot \Delta l(t) + \frac{\partial y_l(t)}{\partial \theta} \Big|_o \cdot \Delta \theta(t)$$

$$\gamma_l(t) = \gamma_{l_0}(t) - \cos(\theta_o(t)) \cdot \Delta l(t) + l_o(t) \cdot \sin(\theta_o(t)) \cdot \Delta \theta(t) \quad (\text{Ec. 2.3.6})$$

Dado que se trabaja en un punto de operación se trata a las variables $l_o(t), \theta_o(t), x_{t0}(t), x_{lo}(t), y_{lo}(t)$ como constantes respecto del tiempo y las derivadas segundas de las (Ec. 2.3.5) y (Ec. 2.3.6) resultan:

$$\ddot{x}_l(t) = A\ddot{x}_t(t) + \sin(\theta_o), A\ddot{l}(t) + l_o, \cos(\theta_o), A\ddot{\theta}(t) \quad (Ec. 2.3.7)$$

$$\ddot{y}_l(t) = -\cos(\theta_o) \cdot \Delta \ddot{l}(t) + l_o \cdot \sin(\theta_o) \cdot \Delta \ddot{\theta}(t) \quad (\text{Ec. 2.3.8})$$

Ahora se toma la ecuación (Ec. 2.2.20) multiplicada por $\sin(\theta(t))$:

$$\sin(\theta(t)) \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot \ddot{y}_l(t) = 2 \cdot F_{hw}(t) \cdot \sin(\theta(t)) \cdot \cos \theta(t) - \sin(\theta(t)) \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot g$$

Y se reemplaza en esta la (Ec. 2.2.19):

$$\sin(\theta(t)) \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot \ddot{y}_l(t) = -m_l(\text{TLK}) \cdot \ddot{x}_l(t) \cdot \cos \theta(t) - \sin(\theta(t)) \cdot m_l(\text{TLK}) \cdot g$$

Luego simplificando la masa de la carga, reordenando y reemplazando las ecuaciones (Ec. 2.3.7) y (Ec. 2.3.8) se obtiene:

$$\begin{aligned} & \sin(\theta(t)) \cdot (-\cos(\theta_o) \cdot \Delta \ddot{l}(t) + l_o \cdot \sin(\theta_o) \cdot \Delta \ddot{\theta}(t)) \\ & + (\Delta \ddot{x}_l(t) + \sin(\theta_o) \cdot \Delta \ddot{l}(t) + l_o \cdot \cos(\theta_o) \cdot \Delta \ddot{\theta}(t)) \cdot \cos \theta(t) + \sin(\theta(t)) \cdot g = 0 \end{aligned}$$

Dado que se trabaja con ángulos pequeños (por requisitos del control deberán ser menores a 20º) se puede aproximar:

$$\sin(\theta) \approx \theta; \quad \sin(\theta_o) \approx \theta_o; \quad \cos(\theta) \approx \cos(\theta_o) \approx 1$$

Y la ecuación previa resulta:

$$-\Delta \ddot{l}(t) \cdot \theta(t) + l_o \cdot \theta_o \cdot \theta(t) \cdot \Delta \ddot{\theta}(t) + \Delta \ddot{x}_l(t) + \theta_o \cdot \Delta \ddot{l}(t) + l_o \cdot \Delta \ddot{\theta}(t) + \theta(t) \cdot g = 0$$

Ya que se toman pequeñas variaciones a partir del punto de operación se tiene: $\theta_o \cdot \Delta \ddot{l}(t) - \Delta \ddot{l}(t) \cdot \theta(t) \approx 0$.

Reagrupando

$$(l_o \cdot \theta_o \cdot \theta(t) + l_o) \cdot \Delta \ddot{\theta}(t) + \Delta \ddot{x}_l(t) + g \cdot \theta(t) = 0$$

Como se trabaja con ángulos pequeños ($\theta_o \cdot \theta(t) + 1$) $l_o \approx l_o$ y la ecuación resulta:

$$l_o \cdot \Delta \ddot{\theta}(t) + \Delta \ddot{x}_l(t) + g \cdot \theta(t) = 0$$

Considerando que el punto de operación es de variación lenta se puede aproximar: $\Delta \ddot{x}_l(t) \approx \ddot{x}_l(t)$ y $\Delta \ddot{\theta}(t) \approx \ddot{\theta}(t)$. Finalmente se obtiene la ecuación que describe la dinámica simplificada del sistema como:

$$l_o \cdot \ddot{\theta}(t) + \ddot{x}_l(t) + g \cdot \theta(t) = 0$$

Aplicando transformada de Laplace y despejando se obtiene:

$$l_o \cdot s^2 \cdot \Theta(s) + s^2 \cdot X_t(s) + g \cdot \Theta(s) = 0$$

$$l_o \cdot s^2 \cdot \Theta(s) + g \cdot \Theta(s) = -s^2 \cdot X_t(s)$$

$$\frac{\Theta(s)}{X_t(s)} = -\frac{s^2}{l_o \cdot s^2 + g} = -\frac{s^2 \cdot \left(\frac{1}{l_o}\right)}{s^2 + \frac{g}{l_o}}$$

Considerando la ecuación (Ec. 2.3.4), sección en la que se había asumido un sistema rígido y por ende $x_t(t) = x_{td}(t)$

$$\frac{X_t(s)}{T_{tm}^*(s)} = \frac{i_t}{s \cdot \left(M_t + \frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \right) s + \left(b_t + \frac{b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td}}{r_{td}} \right)}$$

$$\text{Definiendo } J_{tseq} = \left(M_t + \frac{J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}{r_{td}} \right)$$

y considerando el valor del polo del sistema $p_{2t} = -\frac{b_t \cdot r_{td} + b_{tm} \cdot i_t^2 + b_{td}}{M_t \cdot r_{td} + J_{tm+tb} \cdot i_t^2 + J_{td}}$

$$\frac{X_t(s)}{T_{tm}^*(s)} = \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot s \cdot (s - p_{2t})}$$

Por lo tanto:

$$\frac{\Theta(s)}{T_{tm}^*(s)} = \frac{\Theta(s)}{X_t(s) \cdot T_{tm}^*(s)} = -\frac{s^2 \cdot \left(\frac{1}{l_o}\right)}{s^2 + \frac{g}{l_o}} \cdot \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot s \cdot (s - p_{2t})} = \frac{-s \cdot \left(\frac{i_t}{l_o}\right)}{J_{tseq} \cdot \left(s^2 + \frac{g}{l_o}\right) \cdot (s - p_{2t})}$$

De dónde el polo más rápido del sistema es p_{2t} . Luego

$$\frac{\Theta(s)}{T_{tm}^*(s)} = \frac{-s \cdot \left(\frac{i_t}{l_o}\right)}{J_{tseq} \cdot \left(s^3 - p_{2t} \cdot s^2 + \frac{g}{l_o} \cdot s - p_{2t} \cdot \frac{g}{l_o}\right)} \quad (\text{Ec. 2.3.9})$$

Planteando un PID a partir del error de ángulo de oscilación.

$$T_{tm}^*(t) = K_{P\theta} \cdot e_\theta(t) + K_{I\theta} \cdot \int e_\theta(t) dt + K_{D\theta} \cdot \frac{de_\theta(t)}{dt}$$

$$s \cdot T_{tm}^*(s) = (\Theta^*(s) - \Theta(s))(K_{I\theta} + K_{P\theta} \cdot s + K_{D\theta} \cdot s^2)$$

Reordenando la (Ec. 2.3.9) y reemplazando la consigna anterior

$$\Theta(s) \cdot J_{tseq} \cdot \left(s^3 - p_{2t} \cdot s^2 + \frac{g}{l_o} \cdot s - p_{2t} \cdot \frac{g}{l_o} \right) = - \left(\frac{i_t}{l_o} \right) \cdot s \cdot T_{tm}^*(s)$$

$$\Theta(s) \cdot J_{tseq} \cdot \left(s^3 - p_{2t} \cdot s^2 + \frac{g}{l_o} \cdot s - p_{2t} \cdot \frac{g}{l_o} \right) = \left(\frac{i_t}{l_o} \right) \cdot (\Theta(s) - \Theta^*(s)) (K_{D\theta} \cdot s^2 + K_{P\theta} \cdot s + K_{I\theta})$$

$$\Theta(s) \cdot J_{tseq} \cdot \left(s^3 - \left(p_{2t} + \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot l_o} \cdot K_{D\theta} \right) \cdot s^2 + \left(\frac{g}{l_o} - \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot l_o} \cdot K_{P\theta} \right) \cdot s - \left(p_{2t} \cdot \frac{g}{l_o} + \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot l_o} \cdot K_{I\theta} \right) \right) = - \left(\frac{i_t}{l_o} \right) (K_{D\theta} \cdot s^2 + K_{P\theta} \cdot s + K_{I\theta}) \cdot \Theta^*(s)$$

$$\Theta(s) = \frac{- \left(\frac{i_t}{l_o} \right) (K_{D\theta} \cdot s^2 + K_{P\theta} \cdot s + K_{I\theta})}{J_{tseq} \cdot \left(s^3 - \left(p_{2t} + \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot l_o} \cdot K_{D\theta} \right) \cdot s^2 + \left(\frac{g}{l_o} - \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot l_o} \cdot K_{P\theta} \right) \cdot s - \left(p_{2t} \cdot \frac{g}{l_o} + \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot l_o} \cdot K_{I\theta} \right) \right)}$$

Aplicando el método de sintonía serie para ubicar los polos con $\omega_{pos\theta} = -0.1 \cdot p_{2t}$ y $n_\theta = 3$, se igualan la ecuación característica anterior con la deseada obteniendo:

$$s^3 - \left(p_{2t} + \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot l_o} \cdot K_{D\theta} \right) \cdot s^2 + \left(\frac{g}{l_o} - \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot l_o} \cdot K_{P\theta} \right) \cdot s - \left(p_{2t} \cdot \frac{g}{l_o} + \frac{i_t}{J_{tseq} \cdot l_o} \cdot K_{I\theta} \right) = s^3 + n_\theta \cdot \omega_{pos\theta} \cdot s^2 + n_\theta \cdot \omega_{pos\theta}^2 \cdot s + \omega_{pos\theta}^3$$

Despejando se obtienen las constantes del PID como:

$$K_{D\theta} = -(n_\theta \cdot \omega_{pos\theta} + p_{2t}) \cdot \frac{J_{tseq} \cdot l_o}{i_t}$$

$$K_{P\theta} = \left(\frac{g}{l_o} - n_\theta \cdot \omega_{pos\theta}^2 \right) \cdot \frac{J_{tseq} \cdot l_o}{i_t}$$

$$K_{I\theta} = - \left(\omega_{pos\theta}^3 + p_{2t} \cdot \frac{g}{l_o} \right) \cdot \frac{J_{tseq} \cdot l_o}{i_t}$$

A partir de las ecuaciones anteriores se deduce que las ganancias programadas dependerán del valor de l_o en cada instante discreto.

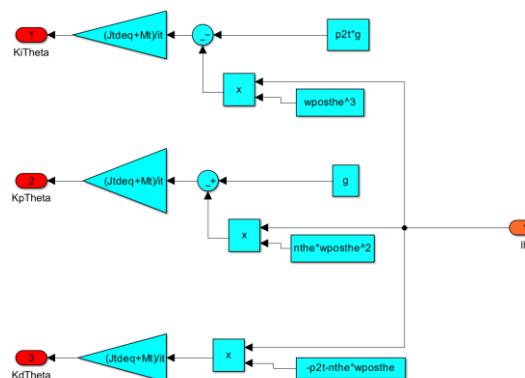


Figura 2.24 Modelo en Simulink del cálculo de los K del PID de oscilación

De forma análoga a las secciones anteriores se obtiene la versión discreta adaptada del PID.

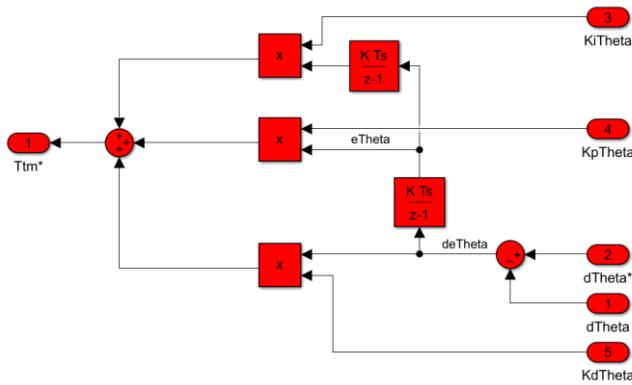


Figura 2.25 Modelo en Simulink del PID de ángulo de oscilación

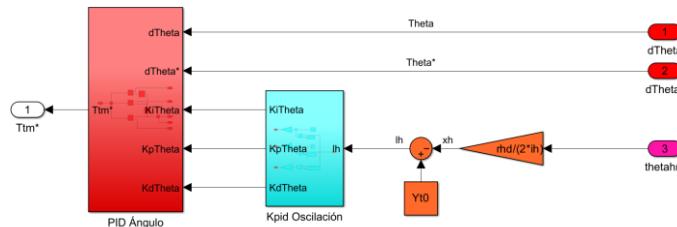


Figura 2.26 Modelo en Simulink del controlador de oscilación completo

2.3.4. Control regulatorio completo

Combinando todos los controladores anteriores, agregando la activación opcional del control de oscilación y colocando las derivadas discretas de las variables correspondientes se obtiene el Nivel 2 completo.

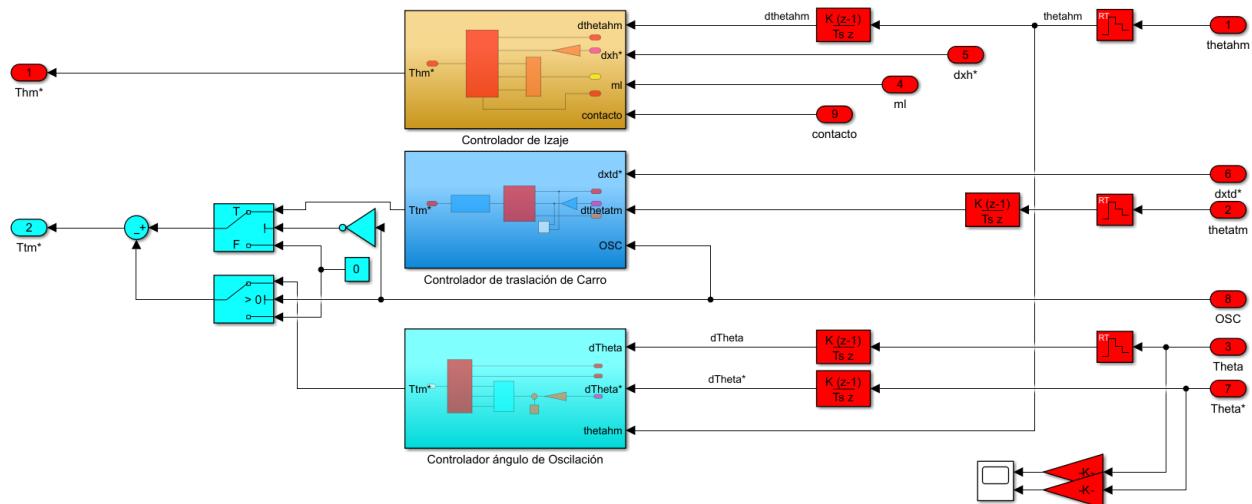


Figura 2.27 Modelo en Simulink del controlador de nivel 2 completo

2.4. Nivel 1: Control Supervisor

El nivel 1 es un control supervisor global de estados discretos activados por eventos. El mismo coordina el accionar ante comandos de operador, activación de fines de carrera normales, detección de cable de izaje flojo y de sobrecarga, operación de Twistlocks y de frenos.

Se encarga de garantizar operación suave y eficiente del sistema, optimizando trayectorias y diagnosticando su estado (Alarmas y Fallas).

2.4.1. Activador del Controlador de balanceo

La finalidad de este subsistema es activar o desactivar el controlador encargado de disminuir el ángulo

que toma la carga. El cuadro “Control_de_balanceo” se encarga de manipular la señal “ctrl_balanceo” que es la encargada de activar o desactivar al controlador automático de oscilación de la carga, a través de dos estados llamados “Activado” y “Desactivado”, cuyas transiciones se ejecutan según la verificación de un selector que manipula la variable “Select_Balanc”.

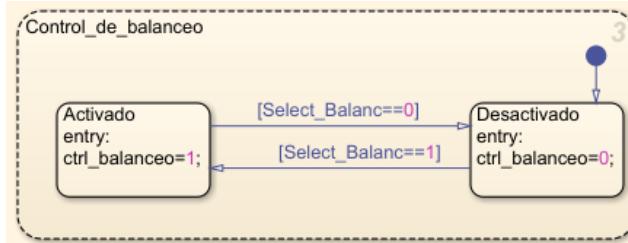


Figura 2.28 Modelo en Stateflow del controlador de balanceo

2.4.2. Señal de Watchdog Timer

Un watchdog es un temporizador interno de la unidad de control (UC), que dispone de su propio oscilador interno y provoca una parada del sistema en caso de que éste se haya bloqueado. Su función es de seguridad, al evitar que el sistema entre en un estado descontrolado.

Se implementa el timer en el nivel 1 donde el “Watchdog” envía una variable “signal” que oscila entre 0 y 1 con un periodo de 1 segundo al nivel 0, para que este último realice una parada de emergencia al detectar que se congelo la señal, y por ende el nivel 1 no responde.

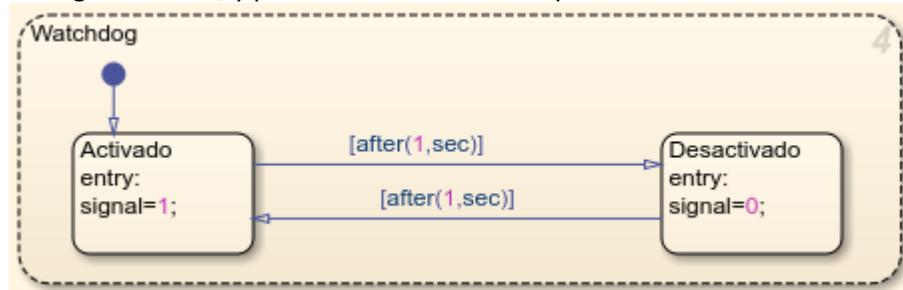


Figura 2.29 Modelo en Stateflow del Watchdog

2.4.3. Estado del Spreader

El cuadro “Spreader” cuenta con un estado llamado “Sin_Apoyo” que le asigna a la variable “contacto” el valor 0, este valor indica a otros estados y elementos del sistema que el spreader no está en contacto con el suelo.

Cuando el spreader se apoya en el suelo la tensión en el cable desaparece, para pasar al estado “Apoyado” se debe cumplir esa condición durante 0,5 segundos por cuestiones de seguridad; ya que por instantes la tensión en el cable puede ser cero sin estar el spreader apoyado.

En el estado “Apoyado” la variable “contacto” toma el valor 1 indicando que el spreader está posicionado sobre el perfil y se permite modificar el estado de los Twistlocks mediante un selector que cambia la variable “TLK” para agarrar o soltar contenedores. Otra variable que cambia de valor es “SCRG” la cual solo es utilizada para comunicar a una lámpara si el spreader está vacío o cargado.

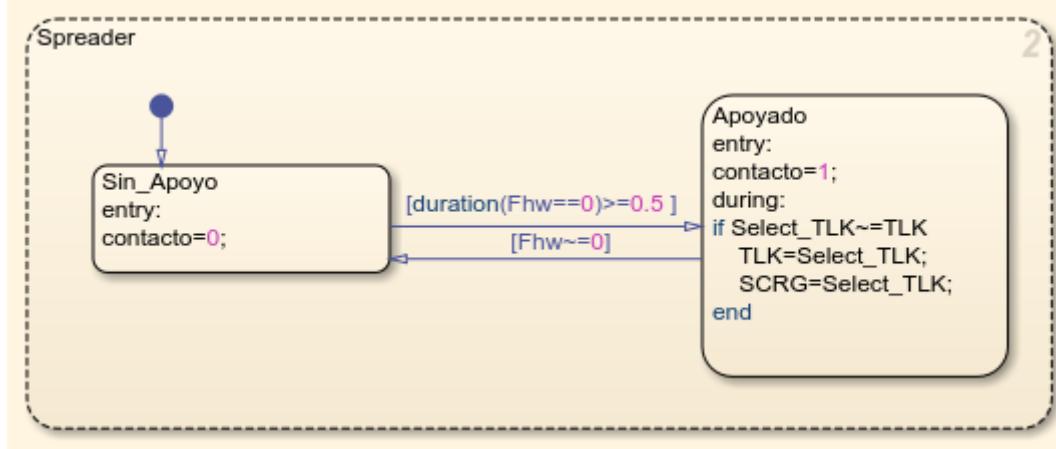


Figura 2.30 Modelo en Stateflow del estado del spreader

2.4.4. Estimador de masa

Para el correcto funcionamiento del controlador de izaje y la detección de sobrecarga, debe estimarse la masa de la carga total, que incluye el Spreader y el contenedor. Esta estimación se realiza durante una operación de izaje inicial controlado, a aceleración despreciable y debe poseer menos de un 1% de error.

De esta manera a partir de la ecuación (Ec. 2.2.20), considerando $\dot{v}_{yl} \approx 0$ y $\theta \approx 0$ se despeja m_l :

$$m_l = \frac{2 \cdot F_{hw}(t)}{g}$$

Con el objetivo de detectar la estabilización de $F_{hw}(t)$, y considerando que durante la maniobra descrita su comportamiento es inicialmente de incremento (previo al despegue del apoyo) con posteriores oscilaciones alrededor del valor de estabilización, se desarrolla el siguiente sistema:

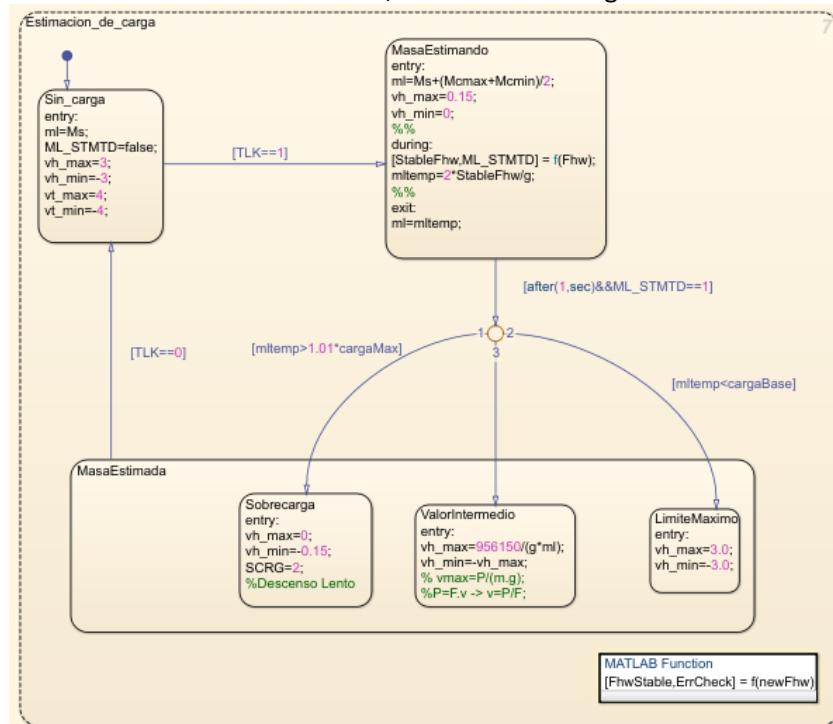


Figura 2.31 Modelo en Stateflow del estimador de masa

En una primera etapa previa a la carga de contenedor la masa toma el valor del Spreader y las velocidades de izaje máximas son configuradas en sus valores límite.

Una vez accionado el TLK, y por ende tomada la carga comienza la etapa de estimación, donde el sistema limita la velocidad de izaje manual a un 5%. Durante esta etapa opera una función que almacena los valores de la Fuerza $F_{hw}(t)$ durante el último segundo, y calcula si la diferencia entre el

máximo y el mínimo de estos no excede un 1% del valor promedio. Si esto se cumple se considera que la fuerza del cable se ha estabilizado y se procede a estimar la masa con el valor promedio mencionado. Finalmente a partir de la masa estimada se define si el caso de operación es de sobrecarga, y en caso de no serlo se calcula la velocidad máxima de izaje permitida de acuerdo a la curva de potencia constante de la Guía de Trabajo.

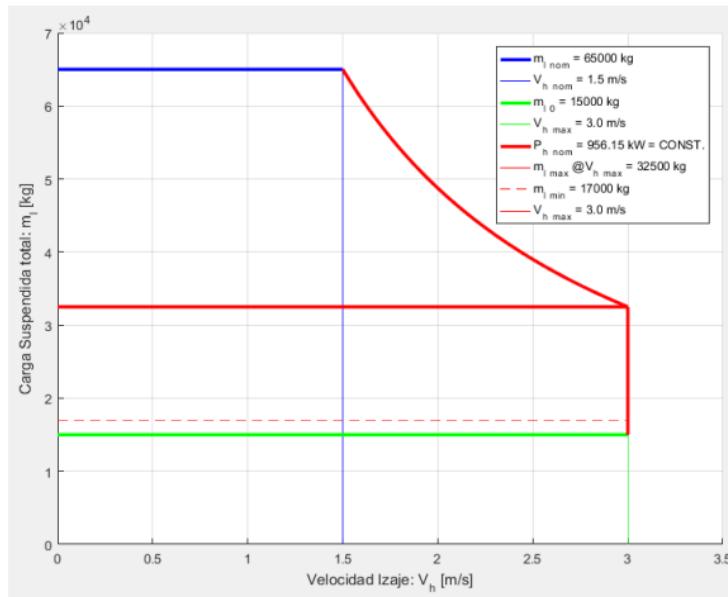


Figura 2.32 Gráfica de velocidad límite de izaje según carga en el spreader a potencia constante

2.4.5. Control de movimiento

El cuadro “movimiento” cuenta con dos grandes estados: “Control_Manual” que se encarga de proveer todas las funciones y subestados necesarios para controlar el movimiento de la grúa mediante el uso de las palancas. Por otro lado, el estado “Automatico” permite generar una secuencia de consignas de forma automática que son necesarias para seguir una trayectoria desde una posición inicial hasta una posición objetivo.

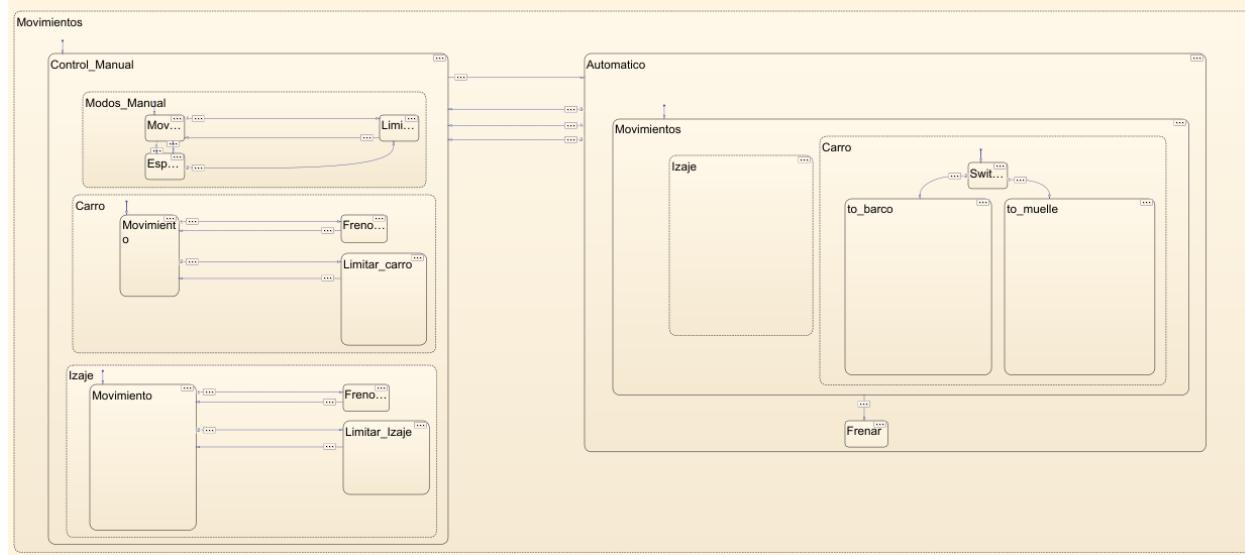


Figura 2.33 Modelo en Stateflow del controlador de movimiento manual y automático

Control Manual

Comenzaremos explicando el estado “Control_Manual” y sus correspondientes subestados. Vemos que al entrar a este estado se asignan valores a la variable “deltaY_auto” que indica cual es la altura máxima del spreader con respecto al perfil del suelo a la que podemos activar el modo automático; y la variable “Go_Manual” indica si ya estamos en el modo manual o tenemos que ir al modo manual.

El primer subestado se llama “Modos_Manual” y únicamente su función se basa en indicarle a lámparas de la interfaz de usuario cual es la situación actual del sistema, el “Modo=1” corresponde a la situación donde el sistema responderá a las consignas enviadas por las palancas, el “Modo=2” es igual al anterior con la diferencia de que al alcanzar un cierta altura dada por “deltaY_auto” se habilita la posibilidad de activar el modo automático, y el “Modo=4” corresponde a la situación donde se activa alguno de los fines de carrera normales por lo que las consignas enviadas por las palancas están restringidas en el sentido indicado por el fin de carrera.

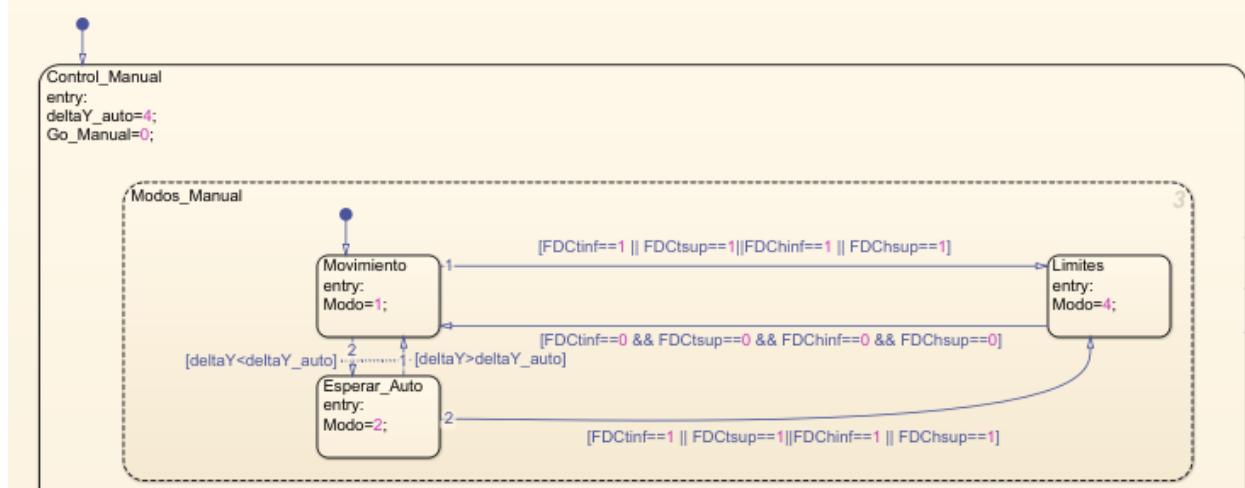


Figura 2.34 Modelo en Stateflow del Modo Manual para el control de lámpara

Los otros dos subestados son “carro” e “Izaje” que se encargan de enviar consignas a sus respectivos reguladores. Vemos que en el estado “Movimiento” si el spreader está en contacto con el suelo “contacto==1” se restringe el movimiento del carro mediante la activación del freno “BRKt” y en el Izaje solo se habilita el freno “BRKh” si la consigna de velocidad es hacia abajo. Si el spreader está colgando entonces se toma como consigna objetivo “vt_obj” y “vh_obj” a los valores otorgados por las palancas que manipula el operario “Select_vt” y “Select_vh”.

El movimiento de izaje implementa un limitador de consigna de velocidad para evitar impacto, así como también ambos cuentan con limitador de velocidad cuando nos acercamos a los límites laterales y superiores del mapa.

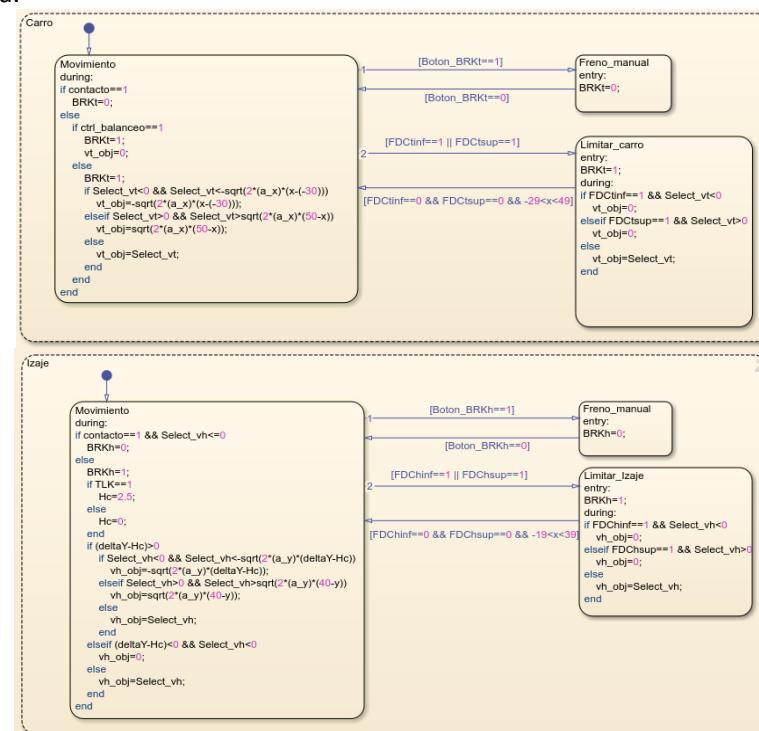


Figura 2.35 Modelo en Stateflow del controlador de Carro e Izaje

Cuando se presionan los botones que activan los frenos se asigna el valor de uno a las variables “Boton_BRKt” y “Boton_BRKh”, por lo que se activa la transición a los estados de “Freno_manual” en donde se produce la activación del freno correspondiente al botón pulsado. Una vez soltado el botón, se vuelve al estado de “Movimiento”.

Por último, cuando se activan los fines de carrera de operación se envía una consigna de velocidad cero y se limita la velocidad consignada por las palancas de acuerdo con el final de carrera que fue activado, de esta manera no es posible solicitarle al sistema que siga avanzando más allá de los límites.

Transiciones manual-automático

Para entrar al modo automático se deben cumplir 3 condiciones, las cuales son: que el selector esté en modo automático, que se cumplan todas las condiciones para estar en el modo 2 y presionar el botón que da inicio al modo automático.

Para volver al modo manual se debe finalizar el proceso automático, momento en el cual la variable “Go_Manual” toma el valor 1. Otra forma de volver al modo manual es interrumpir el proceso cuando se pone el selector en modo “Manual”. Finalmente, si durante el movimiento automático se supera algún límite dado por los finales de carrera, el proceso también se interrumpe y se vuelve al modo manual.

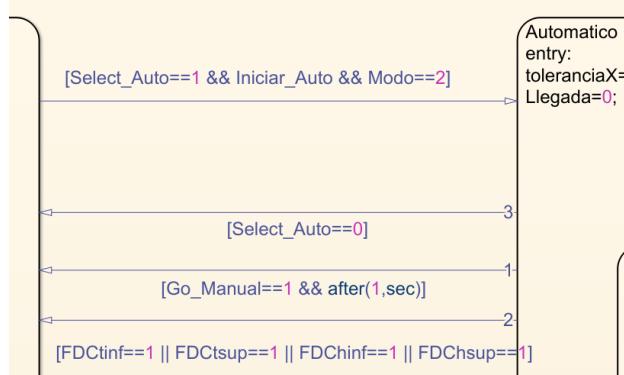


Figura 2.36 Modelo en Stateflow de transiciones entre modo automático y manual

Se observa que al entrar en el modo automático se asignan valores a las variables “toleranciaX” y “toleranciaY” que corresponden a las distancias, tanto en el eje x como en el eje y, que debe mantener el spreader con respecto al perfil del suelo.

Modo automático

Al entrar al modo automático se asigna el valor 3 a la variable “Modo” para indicar a las lámparas que se inició el modo automático y a la variable “x_obj” se le asigna el valor que introdujo el usuario como posición objetivo en x a través del panel de la interfaz.

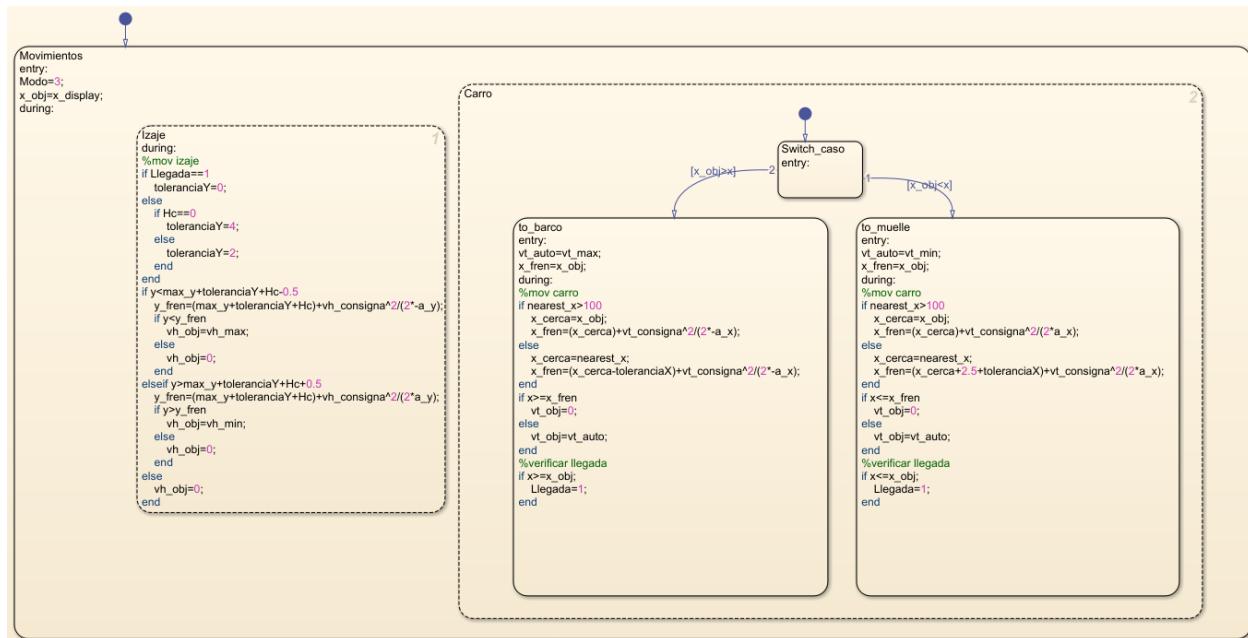


Figura 2.37 Modelo en Stateflow del modo automático de movimiento

Luego se controla el Izaje y el movimiento del carro simultáneamente. El método para generar la trayectoria del Izaje será el mismo sin importar si nos dirigimos al barco o al muelle; por otro lado, la trayectoria del carro si depende si nos dirigimos al barco o al muelle.

Para generar las trayectorias se extraen datos relevantes del perfil del terreno, las cuales son: altura máxima “y_max” entre la posición actual y la objetivo, la distancia “deltaY” entre el spreader y el suelo, la distancia “deltaX” entre el spreader y las paredes laterales, y finalmente la posición en x de la pared más próxima al spreader “nearest_x”. Esta misma función se encarga de registrar el perfil de obstáculos durante la etapa de escaneo y graficar el terreno escaneado para el operario. Para ello hace uso de la distancia medida por el sensor láser durante un recorrido en modo manual de traslación horizontal inicial.

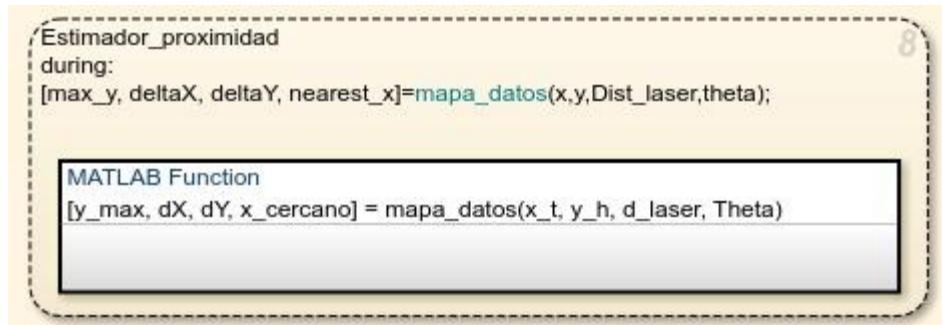


Figura 2.38 Modelo en Stateflow de la función que asiste al modo automático

Se observa que para generar la trayectoria de Izaje, en todo momento se establece como posición objetivo a la suma entre el valor más grande del perfil “y_max” y la tolerancia que nosotros consideramos adecuada “toleranciaY”. A partir de esto, se generan tres situaciones distintas:

- Si el spreader está debajo de la altura objetivo, se calcula cuál es la altura llamada “y_fren” en la cual se tiene que comenzar a frenar considerando la aceleración que puede aplicarse al carro. Mientras estemos por debajo de “y_fren” se sube a velocidad máxima y cuando se alcanza se lleva la consigna de velocidad a cero.
- Si el spreader está por encima de la altura objetivo, el procedimiento es análogo al anterior con la diferencia de que la consigna de velocidad que se envía es negativa para de esa forma poder bajar.
- Si el spreader está en la altura objetivo entonces no debemos subir ni bajar, por lo que la consigna de velocidad se mantiene en cero.

Para generar la trayectoria del carro se debe establecer el signo de la consigna de velocidad “vt_auto” dependiendo si vamos hacia el barco o hacia el muelle. Posteriormente se verifica si hay alguna pared o pila de contenedores que bloquea el paso, si la hay se calcula el “x_fren” en función de la posición en la que se encuentra esta pared “x_nearest” y de la distancia segura que consideramos que se debe mantener “toleranciaX”. Finalmente, cuando ya no hay ninguna pared el “x_fren” se calcula en base a la posición objetivo “x_obj”. Si la posición del carro no alcanza el “x_fren” entonces se avanza a la velocidad máxima permitida, y cuando se alcanza el “x_fren” entonces la consigna se lleva a cero para detener el movimiento. Si el carro alcanza la posición objetivo entonces se activa la transición al siguiente estado mediante la variable “Llegada”.

Cuando “Llegada=1” y la distancia con respecto al suelo es menor que la “toleranciaY” se activa la transición al estado “Frenar”, en este estado se utiliza la variable “Go_Manual” para volver al estado de “Control_Manual”.

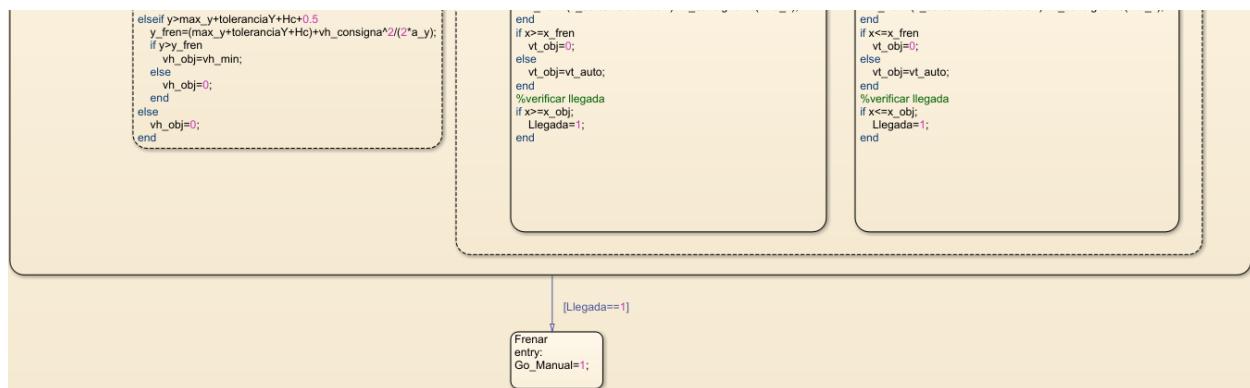


Figura 2.39 Modelo en Stateflow de estados finales del modo automático

2.4.6. Limitador de velocidad

La señal “vt_obj” y “vh_obj” entregadas por el controlador de movimiento deben pasar previamente por el limitador de velocidad y aceleración antes de ser enviadas a los controladores.

Recordamos que la velocidad del carro máxima es ± 4.0 m/s (cargado o sin carga), mientras que la velocidad de izaje depende de la carga total en cada movimiento, la cual es ajustada en el bloque “estimador de masa”.

La función “limitVel” toma la velocidad objetivo y por saturación no permite que tome valores fuera del intervalo $[v_{min}; v_{max}]$. A este valor acotado se lo denomina consignas de referencia “v_ref”

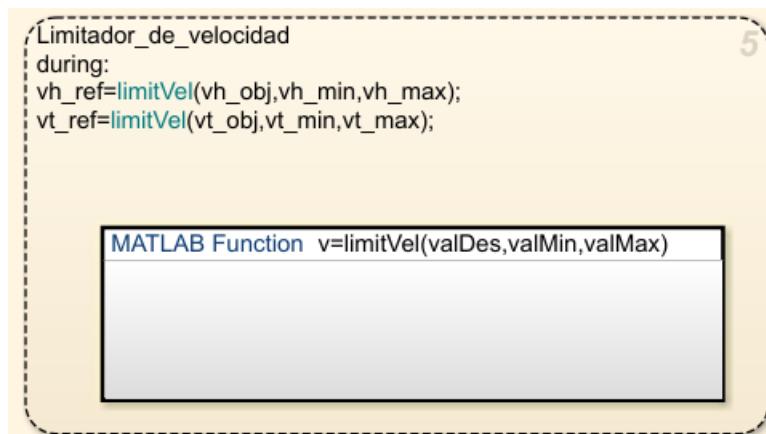


Figura 2.40 Modelo en Stateflow del limitador de velocidad

2.4.7. Limitador de aceleración

Una vez acotada la consigna y obtenidas las consignas de referencia, lo último que queda por hacer es llevar el valor de la consigna de velocidad actual al valor de la consigna de referencia respetando las aceleraciones máximas.

La aceleración máxima de izaje es $\pm 0,75 \text{ m/s}^2$ (cargado o sin carga). Por otro lado, la aceleración máxima del carro es $\pm 0,80 \text{ m/s}^2$ (cargado o sin carga), sin embargo, con esa aceleración se generan ángulos considerables de la carga lo cual dificulta mucho controlar el posicionamiento de la carga en el espacio, aumentando las probabilidades de presenciar colisiones. Para solucionar este problema se limitó mucho más la aceleración del carro, llevándola a $\pm 0,20 \text{ m/s}^2$; de esta forma se lograron reducir en gran medida los ángulos que toma la carga.

La función “limitar_a” toma como entrada la consigna de velocidad actual, la consigna de velocidad de referencia y la aceleración, de esta forma se actualiza la consigna de velocidad actual que es entregada a los controladores.

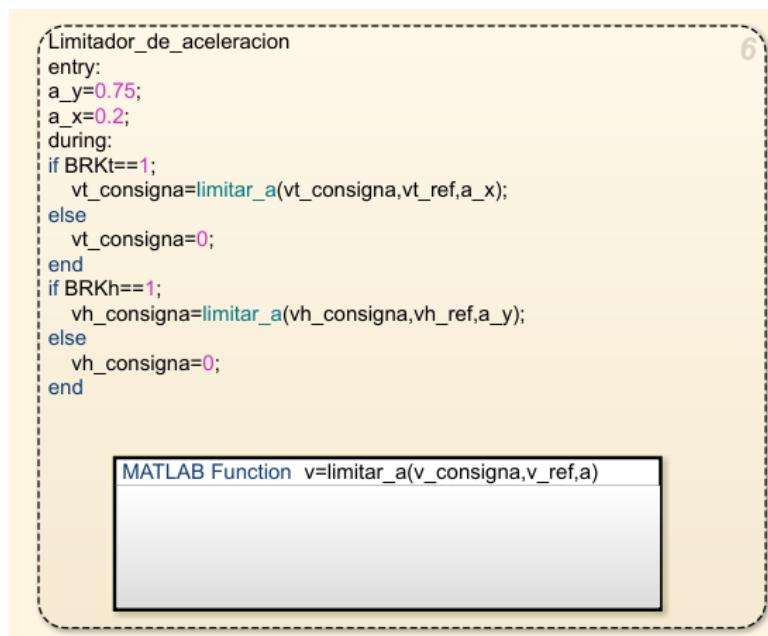


Figura 2.41 Modelo en Stateflow del limitador de aceleración

2.5. Nivel 0: Seguridad

El Nivel 0 de Seguridad o Protección es un autómata reducido y confiable. El mismo toma el control ante fallas críticas de los niveles inferiores y ante riesgos de seguridad.

Contempla el accionar en caso de activación de pulsadores de emergencia, fines de carrera últimos, sensores de sobrevelocidad de izaje y fallas del autómata híbrido de control. Distingue entre emergencias totales, solo de carro y solo de izaje.

Cuando el sistema está funcionando correctamente se inicia el estado “Sistema_ON”, en este estado se verifica constantemente si alguna de las condiciones de emergencia se activa, entre las cuales el watchdog verifica que la señal “signal” que proviene del nivel 1 no tarde más de un segundo en alternar su valor.

Si se activan los fines de carrera de emergencia del Izaje o el sensor de sobrevelocidad, se activan los frenos de emergencia del Izaje; por otro lado se activan los frenos del carro si se activan los fines de carrera de emergencia del mismo, y finalmente si el watchdog detecta alguna inconsistencia o se presiona el botón de emergencia se activan tanto los frenos del carro como del Izaje. Una vez corregidos los errores que llevaron al sistema al estado de emergencia, se puede volver al estado “Sistema_ON”

presionando el botón de reinicio.

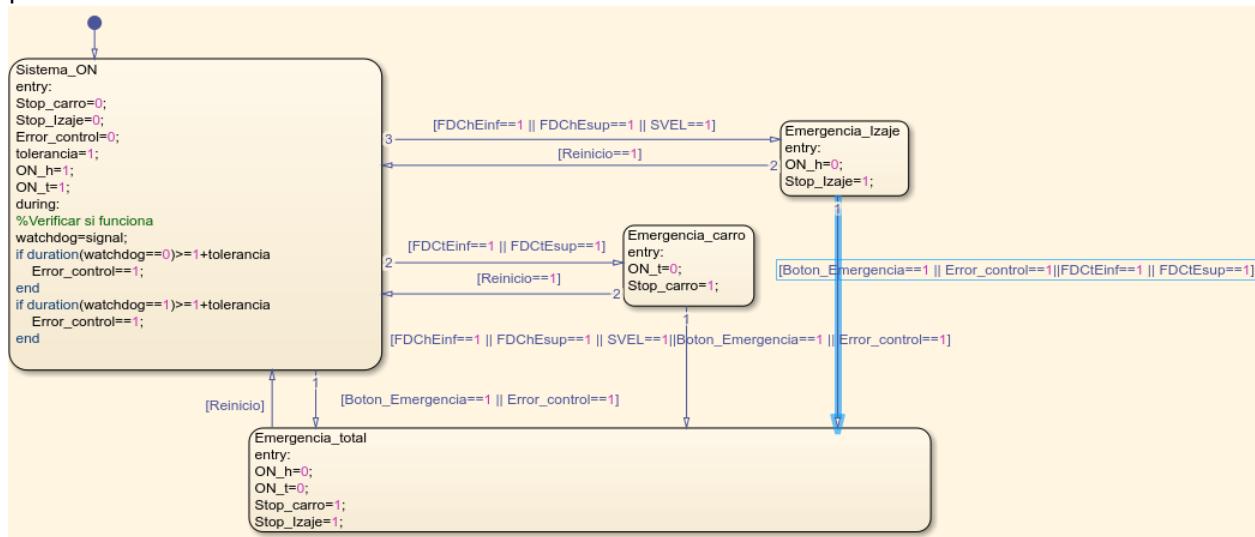


Figura 2.42 Modelo en Stateflow del Nivel 0 de control

2.6. CODESYS

CODESYS es una plataforma de desarrollo de sistemas de control industrial ampliamente utilizada en la automatización y la ingeniería de control. Esta herramienta de programación y desarrollo ofrece un entorno integrado que permite a los ingenieros y programadores diseñar, implementar y mantener sistemas de control en una variedad de aplicaciones industriales. Con su flexibilidad y facilidad de uso, CODESYS se ha convertido en una elección popular para la programación de controladores lógicos programables (PLC), sistemas de automatización y soluciones de control en tiempo real. En esta sección se realiza la traducción del controlador previamente desarrollado en Simulink a CODESYS.

De esta forma los niveles 0, 1 y 2 analizados pueden ser cargados directamente a un PLC y quedar listos para el control de la planta modelada.

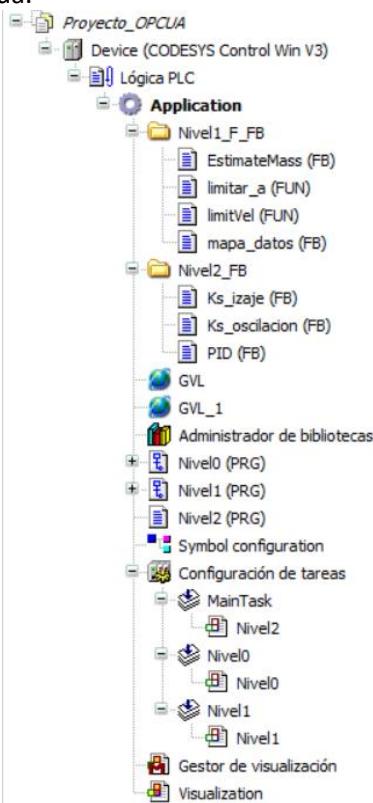


Figura 2.43 Árbol de proyecto en Codesys

En el árbol de proyecto se encuentran las siguientes secciones relevantes:

Nivel1_F_FB: Contiene las funciones y bloques de funciones necesarios para el correcto funcionamiento del nivel 1

Nivel2_FB: Contiene los bloques de funciones necesarios para el correcto funcionamiento del nivel 2.

GVL: Contiene las variables globales compartidas entre el nivel 0,1 y 2 y las variables de entrada y salida del controlador para con la planta

GVL_1: Contiene las constantes del controlador y del modelo de la planta

Nivel0 (PRG): Versión de CODESYS del autómata de protección y seguridad descripto en la sección 2.5

Nivel1 (PRG): Versión de CODESYS del autómata de control supervisor descripto en la sección 2.4

Nivel2 (PRG): Versión de CODESYS del control regulatorio descripto en la sección 2.3

Symbol Configuration: Selección de variables a comunicar con la planta en Simulink.

Configuración de Tareas: Tasks de Codesys que ejecutan los programas desarrollados con sus respectivos períodos dentro del PLC simulado.

Visualization: Versión de la HMI dentro de CODESYS para el control de la planta.

Dentro de los niveles programados se utiliza lenguaje SFC y ST emulando la lógica de Stateflow y Simulink.



Figura 2.44 HMI en Codesys

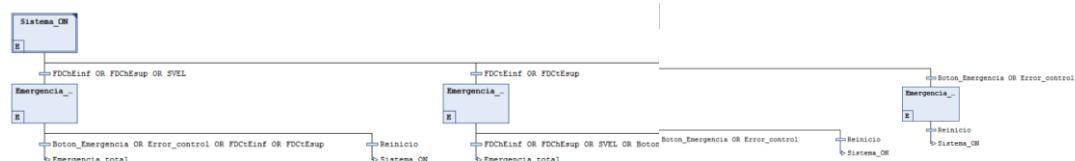


Figura 2.45 Nivel 0 en SFC en Codesys

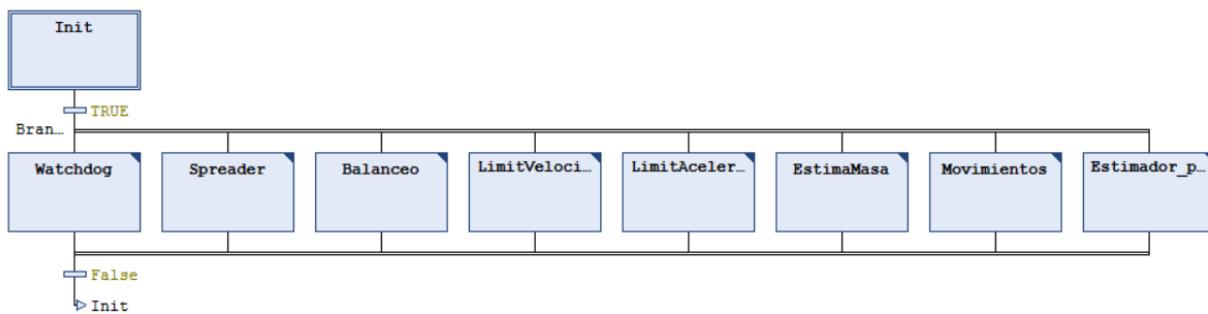


Figura 2.46 Nivel 1 en SFC en Codesys

```

dxh:=dthetahm*rhd/(2*ih);
dxhref:=vh_consigna;
Ks_iza(mass:=m1);
PID_izaje(dxref:=dxhref, dx:=dxh, Kp:=Ks_iza.Kph, Ki:=Ks_iza.Kih, Kd:=Ks_iza.Kdh);
Tmhref:=PID_izaje.ControlOutput;

//Controlador de Traslación
dxtd:=dthetatm*rtd/it;
dxtoref:=vt_consigna;
PID_traslacion(dxref:=dxtoref, dx:=dxtd, Kp:=Kpt, Ki:=Kit, Kd:=Kdt);
Ttmref_trasl:=PID_traslacion.ControlOutput*(Mt+(Jtmrb*EXPT(it,2)+Jtd)/rtd)/it;

//Controlador de Oscilación
Ks_osc(theta_hm:=thetahm);
dThetaref:=0;
PID_oscilacion(dxref:=dThetaref, dx:=dTheta, Kp:=Ks_osc.KpTheta, Ki:=Ks_osc.KiTheta, Kd:=Ks_osc.KdTheta);
Ttmref_osc:=PID_oscilacion.ControlOutput;

//Consigna combinada T^tm
IF ctrl_balanceo=1 THEN
  Ttmref:=Ttmref_trasl-Ttmref_osc;
ELSE
  Ttmref:=Ttmref_trasl;
END_IF
  
```

Figura 2.47 Nivel 2 en ST en Codesys

Para dar acceso a más detalles del programa se adjunta la entrega del informe el proyecto en CODESYS completo.

2.7. HMI

A continuación, se procede a explicar cada uno de los elementos que permiten al usuario interactuar y comunicarse con el sistema:

1. Joystick: este bloque contiene todas las funciones para transformar las posiciones de las palancas del mando en valores de consigna de velocidad para el motor del carro “vt_joystick” y el motor de izaje “vh_joystick”. El carro es controlado por la palanca izquierda y el izaje por la palanca derecha.
2. Pulsadores “Freno Carro” y “Freno Izaje”: estos pulsadores activan los frenos normales de los motores del carro y el izaje respectivamente
3. Lámpara “Manual”: las lámparas son utilizadas para indicar el estado actual del sistema
 - Verde: Modo manual activado, el sistema toma las consignas dadas por el joystick y la entrega a los controladores.
 - Amarillo: Modo manual limitado, al activarse un final de carrera normal en el sistema solo se toman las consignas opuestas al límite activado; el objetivo es no seguir avanzando en esa dirección y no exceder los límites.
 - Gris: Modo manual desactivado, las consignas dejan de tomar los valores del joystick.
4. Lámpara “Automático”:
 - Verde: Modo automático activado, estado en el cual el sistema envía a los motores consignas que siguen las trayectorias generadas automáticamente.

- Azul: Modo automático en espera, estado en el cual el sistema espera que se envíe la señal que inicia el proceso automático.
 - Gris: Modo automático desactivado, el sistema no genera consignas que sigan trayectorias automáticamente.
5. Pulsador “Auto” con panel: Botón que inicia el proceso automático hacia la posición introducida en el panel.
6. Lámpara “contacto”:
- Verde: La carga está en contacto con el suelo.
 - Gris: La carga no está en contacto con el suelo.
7. Selector “cargar-descargar”: se encargan de tomar o soltar una carga siempre y cuando este apoyada en el suelo
8. Lámpara “Cargado”:
- Gris: El spreader está vacío.
 - Amarillo: El spreader está cargado con un contenedor cuya masa no supera el valor límite.
 - Rojo: El spreader está sobrecargado ya que sostiene un contenedor cuya masa supera el valor límite.
9. Selector “Automático-OFF”: Se encarga activar o desactivar la disponibilidad del modo manual
10. Selector “Ctrl_Angulo-OFF”: Se encarga de darle prioridad, o no, al control de balanceo de la carga.
11. Selector “Escanear-OFF”: Activa la lectura de distancia del spreader para actualizar el perfil de obstáculos interno del controlador.
12. Pulsador “Reinicio”: Se encarga de reiniciar el sistema luego de una parada de emergencia
13. Pulsador “Emergencia”: Se encarga de detener el sistema cuando el usuario lo considere adecuado.
14. Lámpara “Falla Carro”:
- Rojo: Estado de falla del carro.
 - Gris: Estado de correcto funcionamiento del carro.
15. Lámpara “Falla Izaje”:
- Rojo: Estado de falla del izaje.
 - Gris: Estado de correcto funcionamiento del izaje.

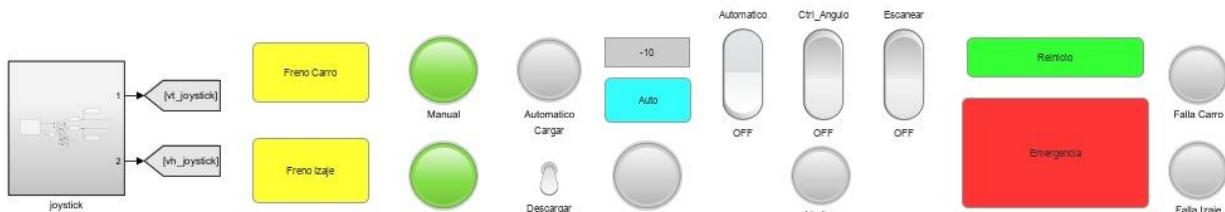


Figura 2.48 HMI en Stateflow



Figura 2.49 Joystick de control de consignas de velocidad

3. Resultados

3.1. Escaneo del perfil de obstáculos

Para que el controlador conozca la distribución de obstáculos, y así calcule la trayectoria que debe seguir en modo automático se realiza una primera etapa de escaneo manual. El spreader sin carga cuenta en su base con un sensor láser de distancia. Se realiza un recorrido horizontal a izaje máximo en el que lee las distancias y en función a estas construye el mapa interno. Se muestra una trayectoria que muestra la construcción parcial del mapa a la mitad de su recorrido, el cual utiliza en las etapas siguientes.

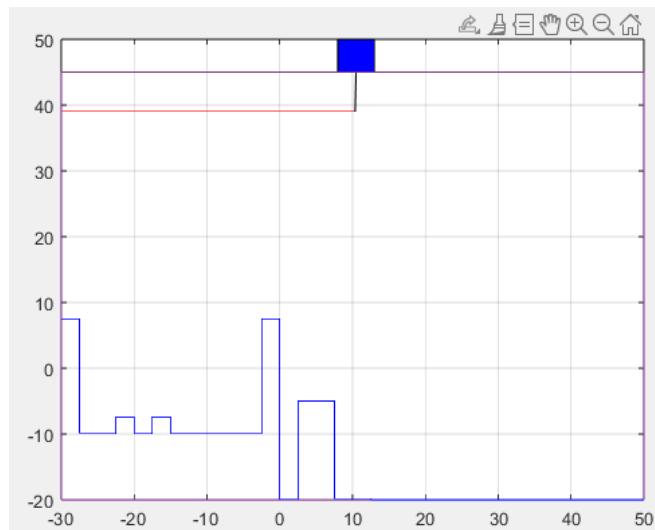


Figura 3.1. Construcción del perfil de obstáculos dentro del controlador

3.2. Ciclo de operación Semi-Automática

Para evaluar el desempeño del sistema de control desarrollado a lo largo de este proyecto, comenzaremos realizando un ciclo completo, es decir ida cargado y retorno descargado. Vemos que se toma un contenedor del barco, se lo lleva al muelle para descargarlo y nuevamente se vuelve al barco para repetir el proceso con un nuevo contenedor.

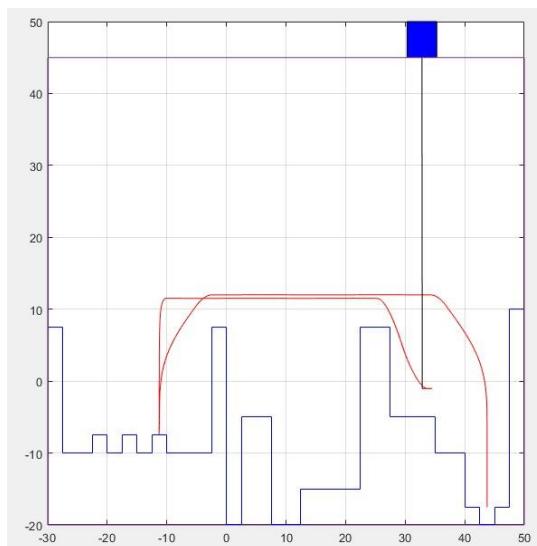


Figura 3.2 Gráfica de recorrido del Spreader en ciclo completo

Uno de los requisitos es que la productividad de esta grúa, para Ciclos Simples repetitivos de operación,

debe ser no menor que 30 contenedores movidos por hora, es decir que la duración de cada ciclo completo no debe ser de más de 2 minutos. En los resultados obtenidos se observa que la duración del ciclo analizado fue de 119 segundos, en una trayectoria de dificultad intermedia. Se espera que se cumpla con el requisito de contenedores por hora considerando la operación mixta de trayectorias más complejas equilibradas en el tiempo por las más simples.

Ahora se procede a mostrar las consignas que el nivel 1 fue enviando a los controladores a lo largo de la trayectoria, entre los cuales se observan la velocidad de Izaje, la velocidad del carro y el ángulo de la carga.

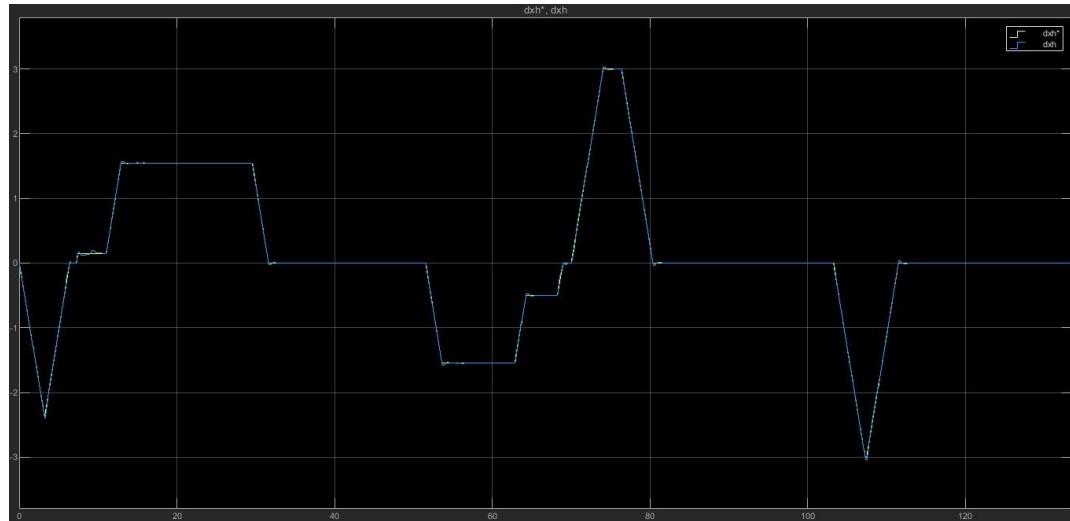


Figura 3.3 Gráficas temporales de velocidad de referencia y velocidad real de izaje en ciclo completo

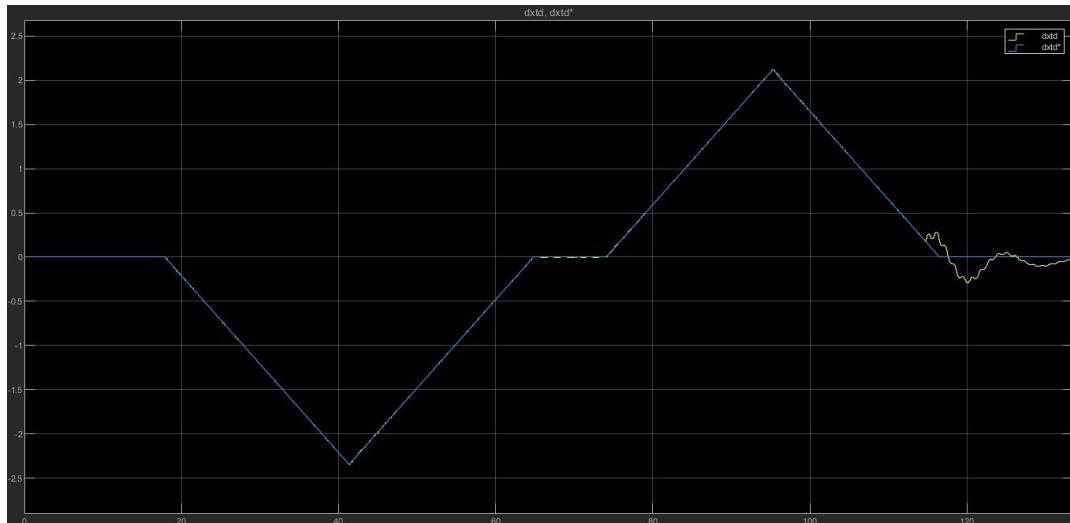


Figura 3.4 Gráficas temporales de velocidad de referencia y velocidad real de traslación de carro en ciclo completo

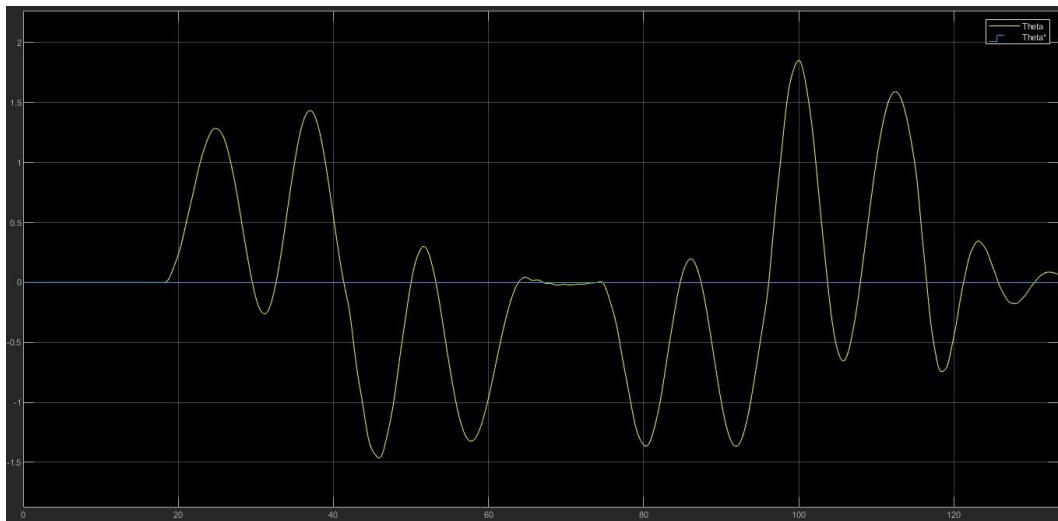


Figura 3.5 Gráficas temporales de ángulo de referencia y ángulo real en ciclo completo

Se observa que tanto la velocidad como la aceleración se mantienen dentro de los valores límites. Las consignas de velocidad entregadas por el nivel 1 consideran los valores límites de estas, obteniendo como resultado una velocidad que crece y decrece de forma lineal a la máxima aceleración posible (excepto cuando se hace contacto con el suelo, momento en el cual se activan los frenos para evitar seguir desenrollando cable) hasta alcanzar el valor límite.

Por otro lado, se observa que el ángulo se mantiene dentro de los valores límites durante el movimiento, y al final de la trayectoria el controlador del ángulo mueve el carro de forma tal que lo lleva a tomar valores menores a uno.

Se procede a explicar las distintas etapas que conforman la trayectoria:

- De 0 a 1: Descenso manual hasta hacer contacto.
- De 1 a 2: Toma de contenedor y estimación de masa.
- De 2 a 3: Ascenso manual.
- De 3 a 4: Trayectoria automática hacia muelle.
- En 4 a 5: Descenso manual lento para soltar la carga.
- De 5 a 6: Ascenso manual.
- De 6 a 7: Trayectoria automática hacia barco.
- En 7: Finaliza el proceso automático y se da prioridad el controlador del ángulo para eliminar el balanceo de forma más rápida.

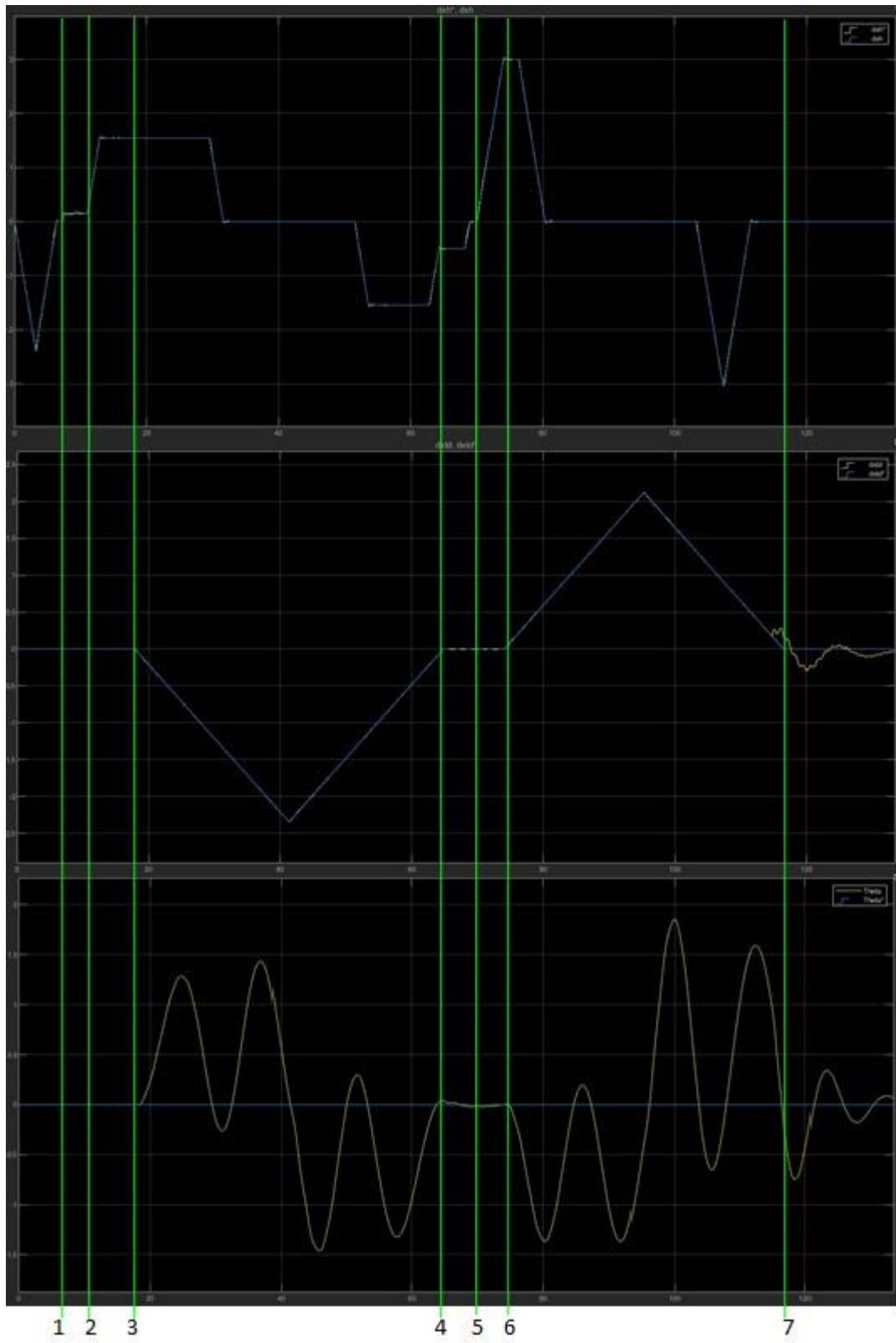


Figura 3.6 Gráficas temporales de referencias y valores reales de velocidad de izaje y carro por etapas en ciclo completo

3.3. Sensores y pulsadores

Se procede a mostrar los resultados de la implementación de los distintos sensores y su respuesta al ser activados. En primer lugar, se verifica el funcionamiento del sistema de control de límites por nivel 1. Este nos impide alcanzar los fines de carrera tanto de izaje como de traslación, al limitar la consigna de velocidad al acercarnos a los extremos.

Se observa que, durante un izaje, y aunque el operario sigue dando la consigna de subida a máxima velocidad el sistema comienza a limitarla antes de los 4 segundos, llevando a velocidad 0 al final y solo permitiendo dar consigna de descenso. El sistema se detiene justo a los 40 metros. Si mediante los controles solicitamos bajar el spreader, como a los 9 segundos, el movimiento puede ser realizado.

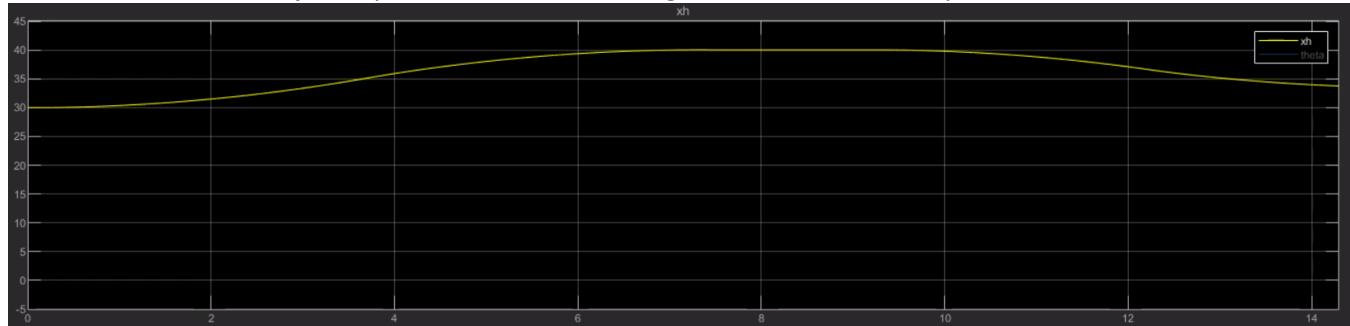


Figura 3.7 Posición de izaje durante la limitación de consigna para evitar extremos

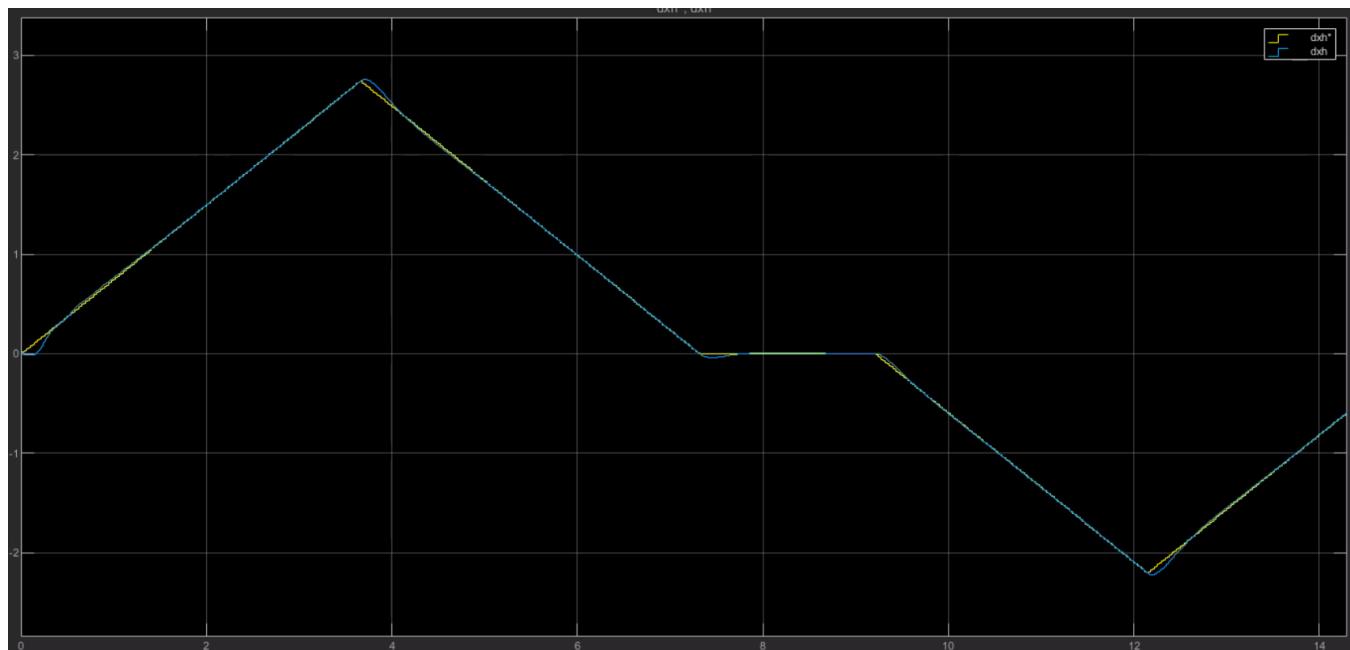


Figura 3.8 Referencia y valor real de velocidad de izaje durante la limitación de consigna para evitar extremos

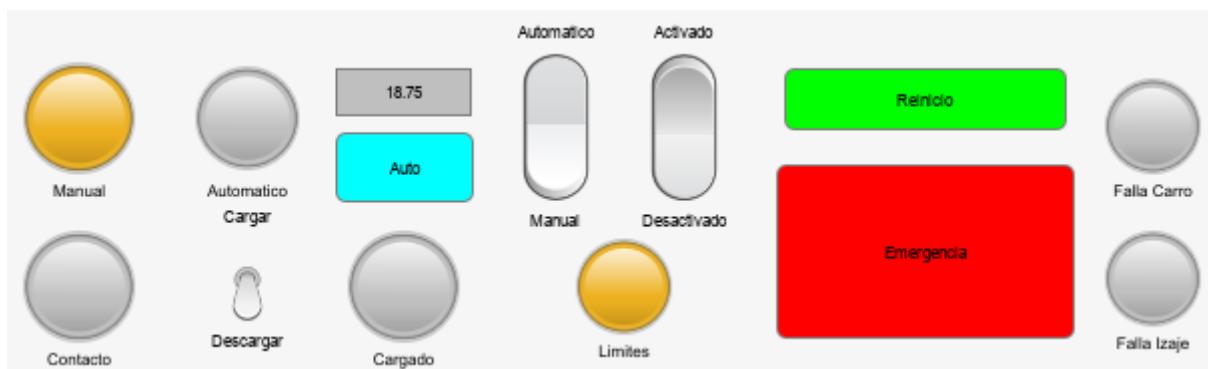


Figura 3.9 HMI ante activación de fin de carrera de operación, si falló primera instancia de limitación de consigna para evitar extremos

Para ensayar el fin de carrera de emergencia se desactiva el control de velocidad de Nivel 1, de forma que se produzca una aproximación a alta velocidad a los extremos de movimiento permitidos. En el marcador 1 se activa el fin de carrera de operación, pero al estar a alta velocidad no alcanza a frenar de forma adecuada por lo que se llega al marcador 2, donde se activa el fin de carrera de emergencia, activando los frenos y llevando el izaje a estado seguro de detención rápidamente.

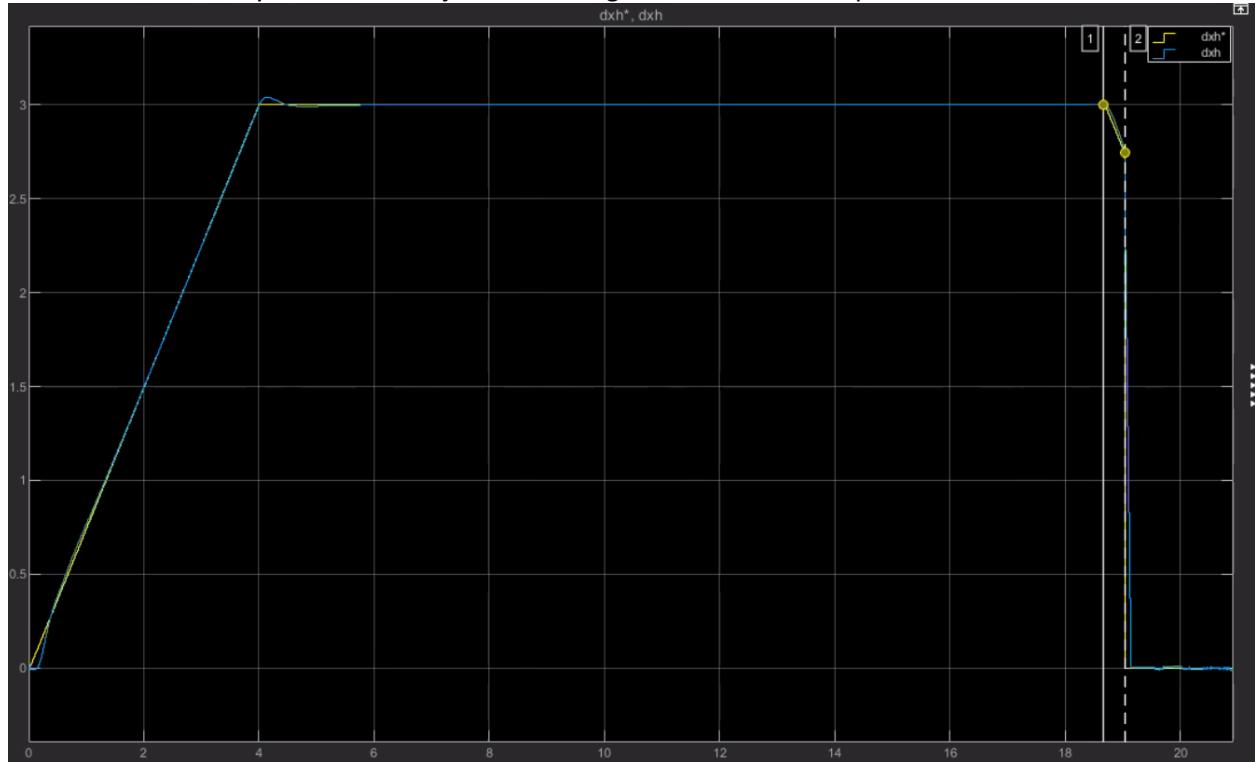


Figura 3.10 Referencia y valor real de velocidad de izaje durante activación de fin de carrera de emergencia

Para evaluar el comportamiento del sensor de sobrevelocidad vamos a quitar la limitación de velocidad que ofrece el nivel 1. Vemos que al superar el 115% de la velocidad máxima de 3m/s se activa el sensor de sobrevelocidad, el cual activa el freno de emergencia del Izaje y limita la consigna enviada a 0.

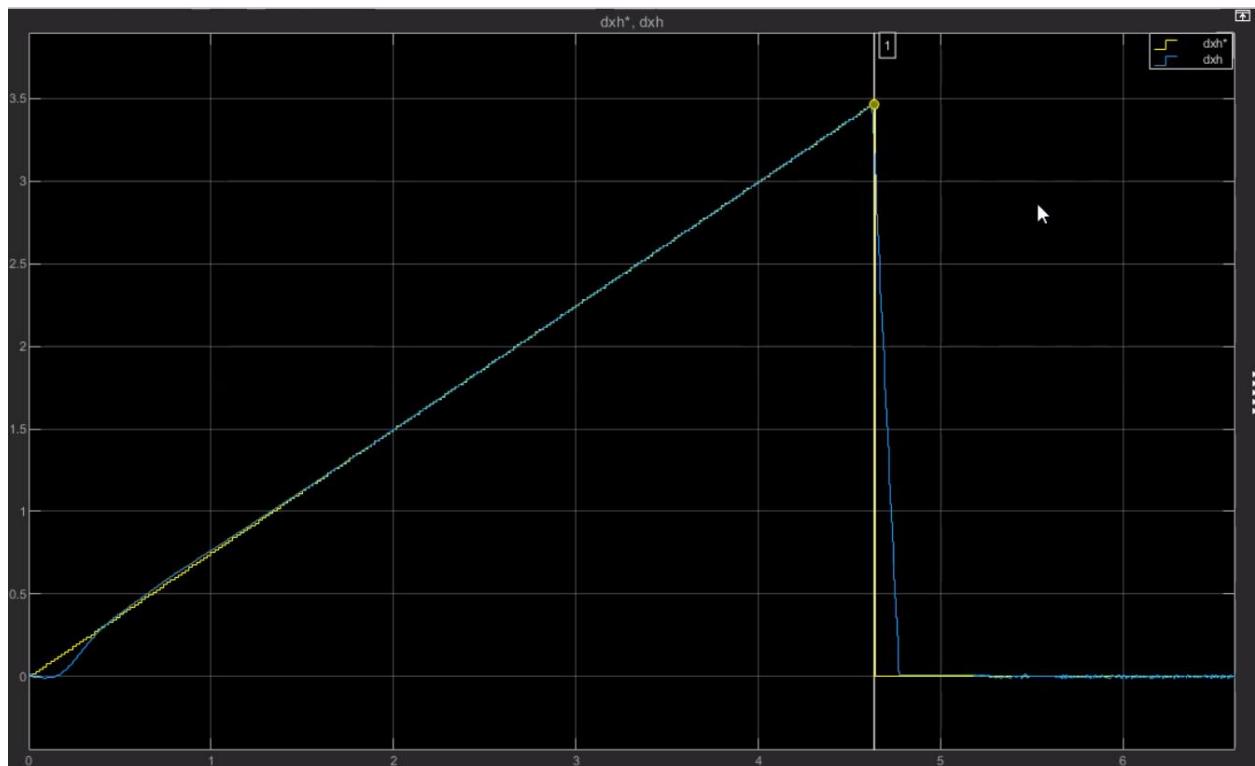
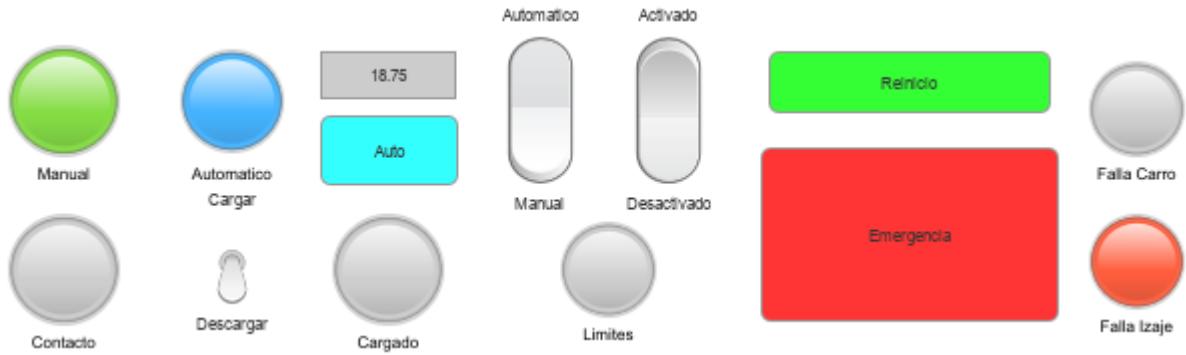
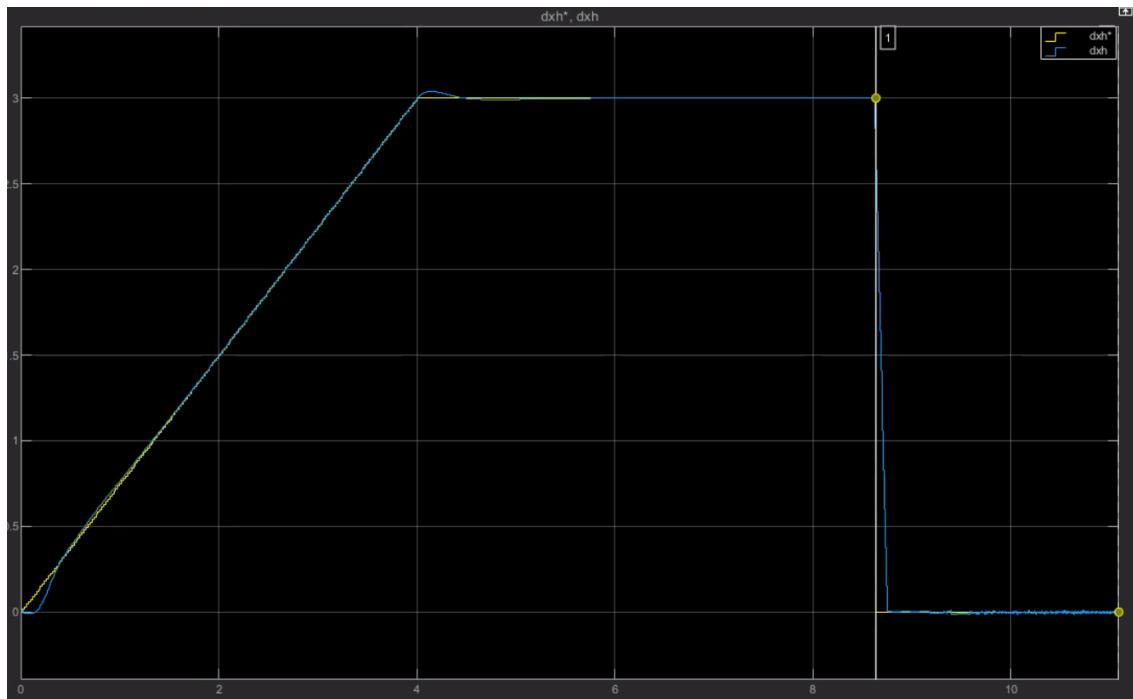


Figura 3.11 Referencia y valor real de velocidad de izaje durante activación de sobrevelocidad*Figura 3.12 HMI ante activación de sobrevelocidad*

Se procede a mostrar el efecto que tienen el watchdog y el botón de emergencia. Ambos se encargan de detener totalmente el sistema en casos de emergencias, es decir que detienen tanto el motor del izaje como el del carro. Para salir de cualquier estado de emergencia del nivel 0 se debe presionar el botón de reinicio una vez que se haya llevado el sistema a un estado seguro. En las figuras siguientes se presiona el botón de emergencia en el marcador 1.

*Figura 3.13 Referencia y valor real de velocidad de izaje durante activación de watchdog o pulsador de emergencia*

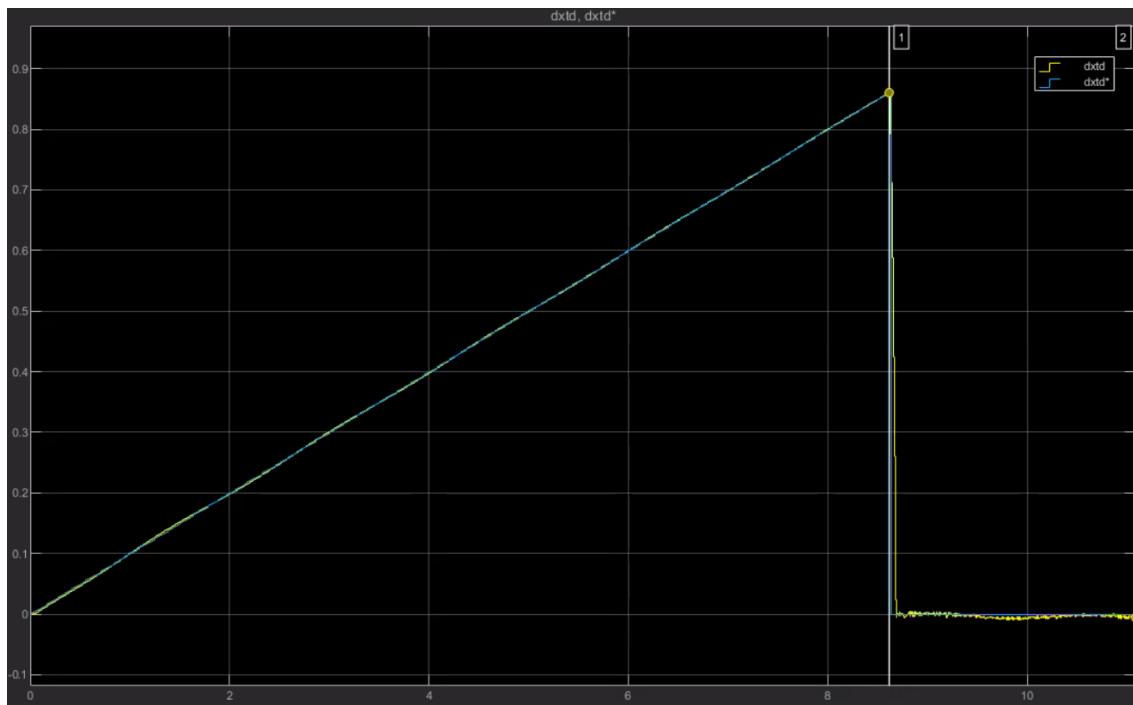


Figura 3.14 Referencia y valor real de velocidad de carro durante activación de watchdog o pulsador de emergencia

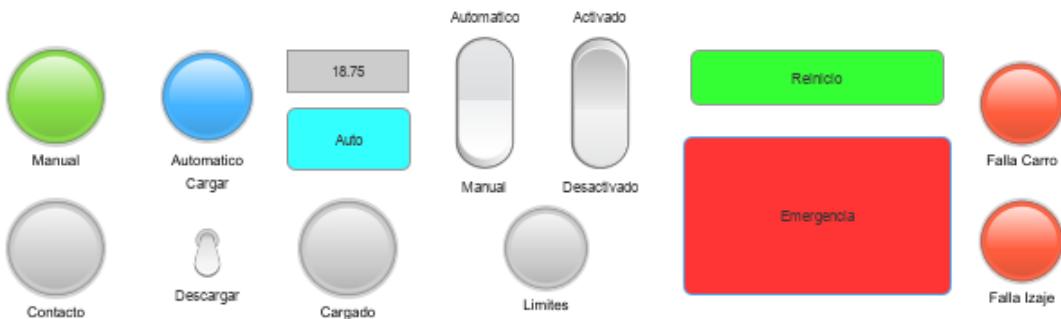


Figura 3.15 HMI durante activación de watchdog o pulsador de emergencia

Se procede a mostrar el funcionamiento del sistema cuando se encuentra sobrecargado debido a que la carga del contenedor excedió los límites seguros. En el marcador número 1 comienza la estimación de masa de container de 55000kg. En el marcador 2 se finaliza la estimación y el sistema detecta la sobrecarga. A partir de entonces el sistema no admite consignas de velocidad que permitan elevar aún más la carga y manda la velocidad a cero. Luego la única acción a realizar es bajar el contenedor nuevamente.

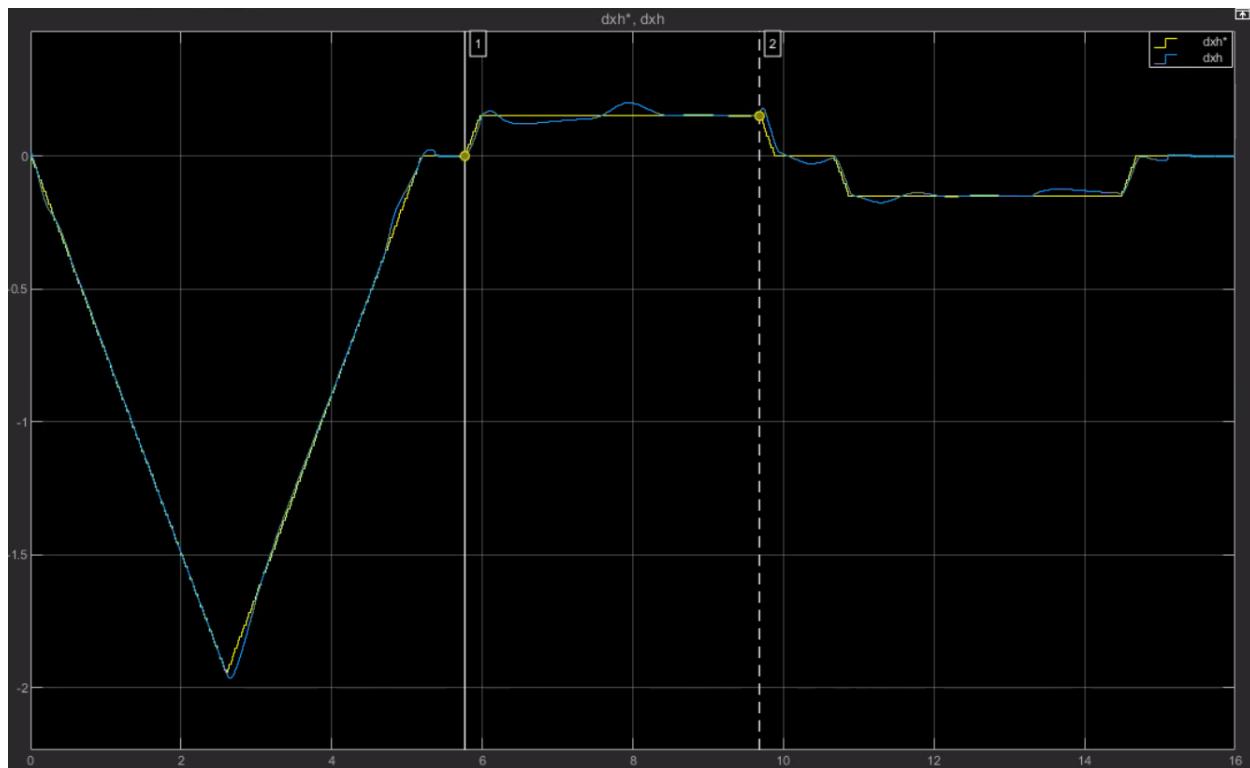


Figura 3.16 Referencia y valor real de velocidad de izaje durante sobrecarga

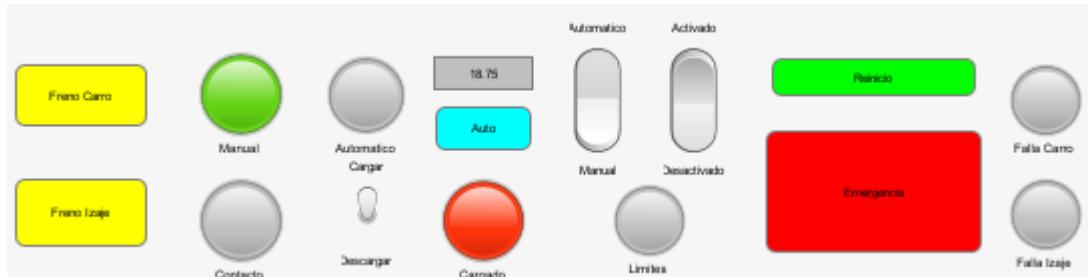


Figura 3.17 HMI durante sobrecarga

Finalmente se realizaron pruebas para comprobar la precisión del estimador de masa, se realizaron tres pruebas donde estimó la masa de las cargas y se realizó el cálculo del error porcentual con respecto al valor real. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Masa real (Kg)	Masa estimada (Kg)	Error (%)
68940	68817	0,18
62944	62898	0,07
55413	55399	0,03

Tabla 1 Error porcentual durante estimaciones de masa de ejemplo

Se observa que el error del estimador de masa no supera el 0,2% en ninguno de los tres casos, por lo que se considera que el mismo presenta una gran precisión.

3.4. Resultados en CODESYS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por el controlador modelado en CODESYS comunicándose con la planta en Simulink vía OPC UA. Los mismos no llegan a emular la calidad del control realizado desde el propio Simulink y esto se debe a una desincronización durante la simulación que provoca comportamientos ocasionalmente inestables no deterministas. El simulador del PLC corriendo el controlador funciona a tiempo real, mientras que la planta en Simulink se simula más lenta, producto de la ralentización que provoca sobre el programa gestionar comunicaciones OPC UA. Sin embargo, se puede apreciar cómo el control logra alcanzar la posición objetivo satisfactoriamente, demostrando la correcta implementación en esta plataforma. Cabe aclarar que se debieron adaptar parámetros del control y que hay presencia de oscilaciones indeseables en la aplicación real.

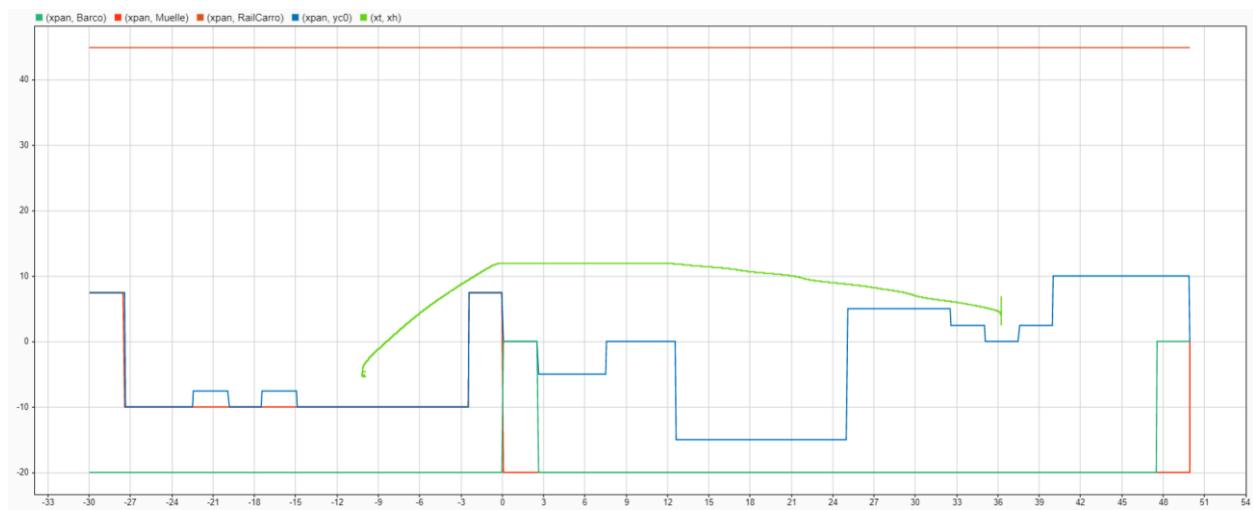


Figura 3.18 Gráfica de posición de spreader durante traslado de carga de barco a muelle



Figura 3.19 Ángulo de oscilación durante traslado de carga de barco a muelle

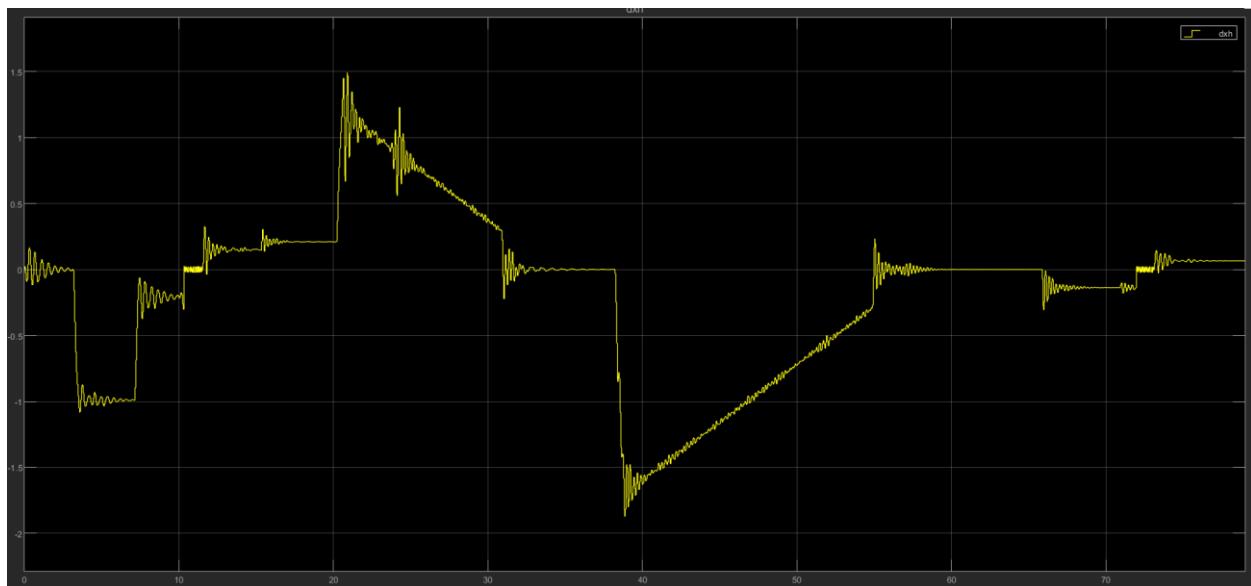


Figura 3.20 Velocidad de izaje durante traslado de carga de barco a muelle

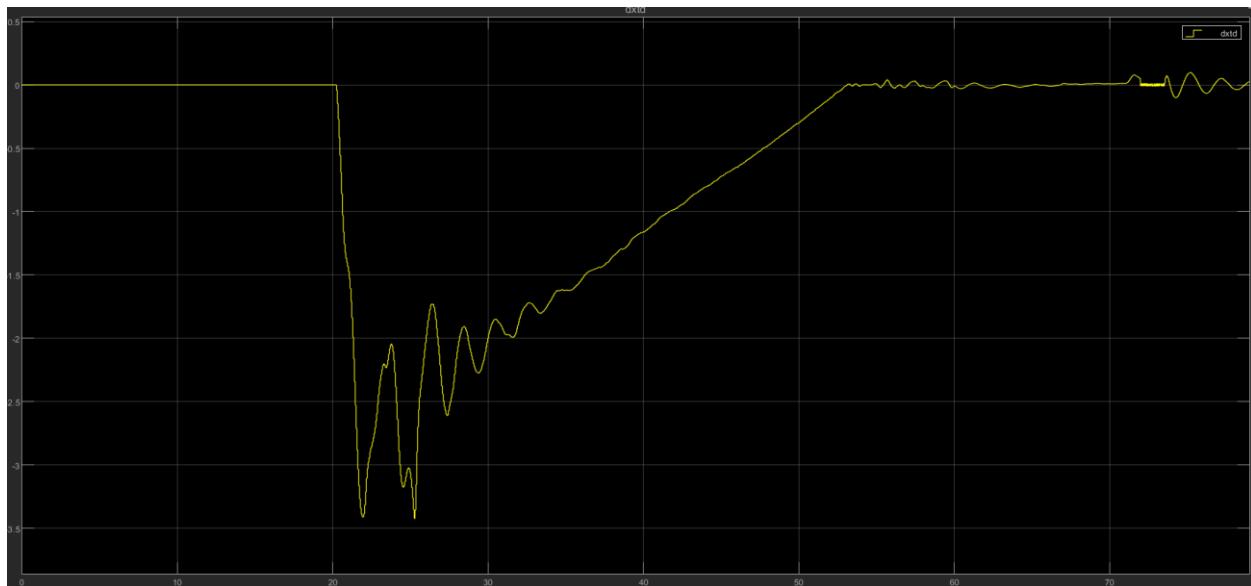


Figura 3.21 Velocidad de traslación de carro durante traslado de carga de barco a muelle

4. Conclusiones

Se completó el desarrollo de los 3 niveles de control exitosamente, alcanzando un rendimiento de 30 contenedores/hora considerando una trayectoria promedio y una comprobada robustez de comportamiento del sistema frente a distintas situaciones que presenta la grúa estudiada en la aplicación real.

Se tradujo el controlador a Codesys donde, aunque la simulación conjunta no es representativa de la realidad por limitaciones de hardware, sí se pudo realizar un control de menor calidad demostrativo del correcto comportamiento del controlador modelado.

También es de destacar el comportamiento del controlador de oscilación de ángulo que al final de la trayectoria permitió una leve mejora en el comportamiento del sistema, reduciendo los ángulos de oscilación por debajo de 1º en tiempos aceptables.

Se considera haber cumplido con los objetivos planteados en el presente trabajo y se plantea el desafío futuro de optimizar el rendimiento del controlador ajustando los polos seleccionados en los diversos controladores PID del control regulatorio una vez esté disponible la planta real, abriendo también la posibilidad del planteo de distintos esquemas de control más efectivos.

5. Referencias

- [1] Julián, G.L. (2022, 12 de diciembre). AyCD_Proyecto Global Integrador_2022_Guía de TRABAJO (Rev. 0).
- [2] Julián, G.L. (2022, 12 de diciembre). AyCD_Proyecto Global Integrador_2022_Guía para preparar INFORME TÉCNICO (Rev. 0).