



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Desarrollo del modelado y el sistema de control de una  
grúa RTG utilizada en la operativa de las terminales  
portuarias de contenedores

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

AUTOR/A: Rodríguez Bascuñana, David

Tutor/a: Simarro Fernández, Raúl

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

# ÍNDICE DE DOCUMENTOS

---

**MEMORIA**

**PRESUPUESTO**

**ANEXOS**

---





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

# Desarrollo del modelado y el sistema de control de una grúa RTG utilizada en la operativa de las terminales portuarias de contenedores

---

## MEMORIA

---

Trabajo Final de Máster

DAVID RODRÍGUEZ BASCUÑANA

Julio, 2024



# RESUMEN

Este trabajo se centra en el modelado, simulación y control de una grúa RTG (Rubber Tyred Gantry). Esta grúa pórtico sobre neumáticos es ampliamente utilizada en las terminales portuarias de contenedores para la gestión del patio.

Las grúas RTG, a diferencia de las grúas RMG (Rail-Mounted Gantry), no tienen tanta facilidad para su automatización, sin embargo, están presentes en la mayoría de las terminales portuarias de contenedores de todo el mundo, y la tendencia actual es la automatización de estos vehículos. Por este motivo, este trabajo se centra en proponer un sistema completo de automatización para este tipo de grúas pórtico.

Las tareas a desarrollar en el trabajo serán:

- Estudio del estado actual de la tecnología de automatización de las grúas RTG y de los sistemas empleados en las terminales portuarias para el control autónomo de este tipo de grúas.
- Modelado y simulación de una grúa RTG tipo, teniendo en cuenta sus características físicas, movimientos y componentes. Esta simulación se implementará en el software Matlab-Simulink.
- Diseño de un sistema de control para los movimientos y operación de la grúa mediante diversas metodologías y selección de la mejor alternativa.
- Implementación del algoritmo de control seleccionado en un autómata programable desde el cual se controlará la grúa.
- Desarrollo de la comunicación entre el sistema simulado y el autómata mediante el protocolo de comunicaciones industriales Modbus.
- Validación de la propuesta de control, así como de la simulación planteada.

**Palabras clave:** Control; Terminal portuaria de contenedores; grúa pórtico; Modbus; simulación;





# RESUM

Aquest treball se centra en el modelatge, simulació i control d'una grua RTG (Rubber Tyred Gantry). Esta grua pòrtic sobre pneumàtics és àmpliament utilitzada en les terminals portuàries de contenidors per a la gestió del pati.

Les grues RTG, a diferència de les grues RMG (Rail-Mounted Gantry), no tenen tanta facilitat per a la seua automatització, no obstant això, són presents en la majoria de les terminals portuàries de contenidors de tot el món, i la tendència actual és l'automatització d'estos vehicles. Per este motiu, este treball se centra en proposar un sistema complet d'automatització per a esta mena de grues pòrtic.

Les tasques a desenvolupar en el treball seran:

- Estudi de l'estat actual de la tecnologia d'automatització de les grues RTG i dels sistemes emprats en les terminals portuàries per al control autònom d'esta mena de grues.
- Modelatge i simulació d'una grua RTG tipus, tenint en compte les seues característiques físiques, moviments i components. Esta simulació s'implementarà en el programari Matlab-Simulink.
- Disseny d'un sistema de control per als moviments i operació de la grua mitjançant diverses metodologies i selecció de la millor alternativa.
- Implementació de l'algorisme de control seleccionat en un autòmat programable des del qual es controlarà la grua.
- Desenvolupament de la comunicació entre el sistema simulat i l'autòmat mitjançant el protocol de comunicacions industrials Modbus.
- Validació de la proposta de control, així com de la simulació plantejada.

**Paraules clau:** Control; Terminal portuària de contenidors; grua pòrtic; Modbus; simulació;



# ABSTRACT

This work focuses on the modeling, simulation and control of an RTG (Rubber Tyred Gantry) crane. This tire gantry crane is widely used in port container terminals for yard management.

RTG cranes, unlike RMG (Rail-Mounted Gantry) cranes, are not so easy to automate; however, they are present in most container port terminals around the world, and the current trend is automation of these vehicles. For this reason, this work focuses on proposing a complete automation system for this type of gantry cranes.

The tasks to be carried out at work will be:

- Study of the current state of automation technology for RTG cranes and the systems used in port terminals for the autonomous control of this type of cranes.
- Modeling and simulation of an RTG type crane, taking into account its physical characteristics, movements and components. This simulation will be implemented in Matlab-Simulink software.
- Design of a control system for the movements and operation of the crane using various methodologies and selection of the best alternative.
- Implementation of the selected control algorithm in a programmable controller from which the crane will be controlled.
- Development of communication between the simulated system and the PLC using the Modbus industrial communications protocol.
- Validation of the control proposal, as well as the proposed simulation.

**Keywords:** Control; Container port terminal; gantry crane; Modbus; simulation;



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1:	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ANTECEDENTES .....	2
1.2	OBJETIVOS .....	3
1.3	DESCRIPCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	4
CAPÍTULO 2:	ESTUDIO PRELIMINAR DEL ESTADO DE LA AUTOMATIZACIÓN EN LAS TPCS .....	5
2.1	INTRODUCCIÓN .....	5
2.2	ESTRUCTURA .....	5
2.3	RESUMEN Y ESTRUCTURA DE LAS TPCS .....	5
2.4	EL SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO .....	6
2.5	AUTOMATIZACIONES SOBRE EL PATIO DE CONTENEDORES Y LAS GRUAS RTG .....	8
CAPÍTULO 3:	MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA GRÚA .....	11
3.1	INTRODUCCIÓN .....	11
3.2	ESTRUCTURA .....	11
3.3	ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA GRÚA RTG .....	11
3.3.1	Estructura pórtico.....	12
3.3.2	Bogies .....	14
3.3.3	Carro .....	16
3.3.4	Sistema de elevación .....	18
3.3.5	Sistema de abastecimiento .....	24
3.3.6	Otros sistemas .....	26
3.4	DATOS TÉCNICOS DE UNA GRÚA RTG TIPO .....	27
3.5	MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO DE LA GRÚA.....	30
3.6	MODELO EN SIMULINK DE LA GRÚA RTG.....	35
3.6.1	Creación de modelos 3D.....	35
3.6.2	Creación del modelo simulado en Simscape multibody.....	39
CAPÍTULO 4:	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	49
4.1	INTRODUCCIÓN .....	49
4.2	ESTRUCTURA .....	49
4.3	ENSAYOS PRELIMINARES.....	49
4.3.1	Ensayos de la relación Fc-PxS .....	50

4.3.2	Ensayos de la relación Fy-PyS .....	51
4.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL POR PLANIFICACIÓN DE GANANCIAS.....	53
4.4.1	Linealización de la planta en cada condición operativa .....	54
4.4.2	Sintonizar las ganancias del PID para cada condición definida .....	57
4.4.3	Esquema e implementación del control de ganancias.....	59
4.5	ENSAYOS SOBRE EL CONTROL PID DE LA GRÚA.....	61
4.6	SISTEMA DE CONTROL ANTI-BALANCEO.....	67
4.7	COMPARATIVA DE LOS CONTROLES Y CONCLUSIONES .....	69
CAPÍTULO 5:	IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL.....	73
5.1	INTRODUCCIÓN .....	73
5.2	ESTRUCTURA .....	73
5.3	ENTORNO DE TRABAJO, COMUNICACIÓN Y DATOS.....	73
5.4	PROGRAMACIÓN DEL PLC .....	75
5.4.1	Programas de PIDs.....	75
5.4.2	Programa de planificación de ganancias .....	77
5.4.3	Programa de las referencias.....	78
5.5	VALIDACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL .....	79
CAPÍTULO 6:	COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS .....	83
6.1	INTRODUCCIÓN .....	83
6.2	ESTRUCTURA .....	83
6.3	PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN Y GENERALIDADES .....	83
6.4	COMUNICACIÓN ENTRE MODELO DE LA GRÚA Y PLC .....	83
6.5	EXTRAPOLACIÓN A UNA COMUNICACIÓN CON EL SISTEMA REAL.....	85
CAPÍTULO 7:	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	87
7.1	INTRODUCCIÓN .....	87
7.2	ESTRUCTURA .....	87
7.3	CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS.....	87
7.4	AMPLIACIONES Y MEJORAS.....	88
7.5	CONCLUSIONES .....	89
REFERENCIAS	.....	91

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Subsistemas de una terminal de contenedores (Fundación ValenciaPort, 2012).....	5
Figura 2 Configuraciones del área de almacenamiento según el equipo de patio, (Fundación ValenciaPort, 2012) .....	7
Figura 3 Tendencias en la automatización de TPCs (Fundación ValenciaPort, 2012) .....	8
Figura 4 Retrofitting para la automatización de RTGs (Fundación ValenciaPort, 2012) .....	9
Figura 5 Grúa de patio RTG (Konecranes, s.f.) .....	12
Figura 6 Vista perfil de un RTG (Konecranes, s.f.) .....	13
Figura 7 Vista frontal de un RTG (Konecranes, s.f.).....	13
Figura 8 Bogie (Konecranes, s.f.) .....	14
Figura 9 pivot locking (Villodres Martín, 2017) .....	15
Figura 10 Movimientos del pórtico según la posición de las ruedas (Konecranes, s.f.) .....	16
Figura 11 Motor del carro (derecha) desacoplado del eje reductor (izquierda) (Villodres Martín, 2017) .....	17
Figura 12 cadena portacables (conelectronica, 2020) .....	17
Figura 13 Elementos del polipasto (Villodres Martín, 2017).....	18
Figura 14 Sistemas de cableado del polipasto: principal y auxiliar (Villodres Martín, 2017).....	19
Figura 15 Spreader con aletas (Cornelissen, s.f.) .....	20
Figura 16 Twistlocks en la cubierta de un buque portacontenedores (Cozanet, s.f.).....	21
Figura 17 Sistema de twistlocks en una viga lateral (Konecranes, s.f.).....	22
Figura 18 Elementos de un spreader telescópico (Konecranes, s.f.) .....	22
Figura 19 cierre de la posición telescópica mediante los cilindros de cierre (Konecranes, s.f.) .....	24
Figura 20 autómatas maestro de una grúa RTG (Villodres Martín, 2017).....	26
Figura 21 Ejes de desplazamiento de la carga de la grúa RTG modificado de (Konecranes, s.f.) .....	30
Figura 22 Esquema del sistema carro con péndulo.....	31
Figura 23 Simulación del movimiento del carro ante el modelo matemático inicial.....	34
Figura 24 Simulación del movimiento del pórtico ante el modelo matemático inicial.....	34
Figura 25 Modelo CAD del pórtico .....	36
Figura 26 Modelo CAD de las ruedas .....	37
Figura 27 Modelo CAD del carro .....	37
Figura 28 Modelo CAD del spreader .....	38

Figura 29 Modelo CAD del contenedor de 20 pies.....	38
Figura 30 Esquema externo en Simulink del modelo de la grúa RTG .....	40
Figura 31 Esquema del subsistema de la grúa RTG en Simulink .....	41
Figura 32 Subsistema <i>Conexión Suelo-Pórtico</i> .....	42
Figura 33 Subsistema <i>Conexión Ruedas</i> .....	42
Figura 34 Subsistema <i>Junta carro</i> .....	43
Figura 35 Subsistema <i>Cables</i> .....	43
Figura 36 Subsistema <i>Enganche contenedor</i> .....	44
Figura 37 Ventana Mechanism Explorer, representación gráfica de la simulación .....	44
Figura 38 Ensamblaje del modelo simulado de la grúa en Simscape.....	45
Figura 39 Modelos y componentes de la fricción, (a) fricción estática, (b) fricción de Coulomb, (c) fricción viscosa (d) Coulomb + fricción viscosa, (e) estática + Coulomb + fricción viscosa, (f) estática + Coulomb + fricción viscosa con efecto Stribeck (Rajapakshe, 2011).....	46
Figura 40 Simulación del movimiento del carro ante el modelo simulado, movimiento de carro .....	47
Figura 41 Simulación del movimiento del carro ante el modelo simulado, movimiento de pórtico....	47
Figura 42 Ensayo Fc-PxS con variación de L .....	50
Figura 43 Ensayo Fc-PxS con variación de Mc.....	51
Figura 44 Ensayo Fy-PyS con variación de Mc.....	52
Figura 45 Ensayo Fy-PyS con variación de Mc.....	52
Figura 46 Esquema general planificación de ganancias (elaboración propia) .....	53
Figura 47 Esquema Simulink para la identificación.....	55
Figura 48 Esquema general para la sintonización de los controladores PID para planificación de ganancias (elaboración propia) .....	57
Figura 49 Respuesta en la posición x de los bucles cerrados lineales tras la sintonización de los reguladores PID .....	58
Figura 50 Respuesta en la posición y de los bucles cerrados lineales tras la sintonización de los reguladores PID .....	59
Figura 51 Ejemplo de bloque <i>2-D lookup table</i> .....	61
Figura 52 Proceso de recogida y depósito de contenedor.....	62
Figura 53 Variación de las ganancias a lo largo de la operación, control PID .....	62
Figura 54 Variación de las variables de planificación a lo largo de la operación .....	63
Figura 55 Seguimiento de referencias con planificación de ganancias y control PID, ensayo 1.....	63
Figura 56 Seguimiento de referencias con planificación de ganancias y control PID, ensayo 2.....	64
Figura 57 Acciones de control con planificación de ganancias y control PID.....	65



Figura 58 Potencias con planificación de ganancias y control PID.....	65
Figura 59 Ángulos de oscilación del contenedor con planificación de ganancias y control PID .....	66
Figura 60 Diagrama de un control anti-balanceo (Solihin, 2008).....	67
Figura 61 Variación de las ganancias a lo largo de la operación, control anti-balanceo .....	69
Figura 62 Seguimiento de referencias con planificación de ganancias y control anti-balanceo .....	70
Figura 63 Acciones de control con planificación de ganancias y control anti-balanceo.....	70
Figura 64 Potencias con planificación de ganancias y control anti-balanceo .....	71
Figura 65 Ángulos de oscilación del contenedor con planificación de ganancias y control anti-balanceo .....	72
Figura 66 Ensayo de control de la grúa, salidas, control dentro de Simulink .....	80
Figura 67 Ensayo de control de la grúa, fuerzas, control dentro de Simulink.....	80
Figura 68 Ensayo de control de la grúa, salidas, control desde PLC.....	81
Figura 69 Ensayo de control de la grúa, fuerzas, control desde el PLC.....	81
Figura 70 Esquema de la comunicación Modbus (elaboración propia) .....	84
Figura 71 Registros en Codesys y sus direcciones.....	84

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos generales de la grúa tipo .....	27
Tabla 2 Características principales de la grúa tipo .....	27
Tabla 3 Velocidades de los movimientos de la grúa tipo .....	28
Tabla 4 Características del motor de elevación de la grúa tipo .....	28
Tabla 5 Características de la reductora de elevación de la grúa tipo.....	28
Tabla 6 Características del freno de elevación de la grúa tipo.....	28
Tabla 7 Características de los bogies de la grúa tipo.....	28
Tabla 8 Características del motor diésel de la grúa tipo .....	29
Tabla 9 Masa de las grúas RTG y sus elementos .....	29
Tabla 10 Características de los contenedores marítimos .....	29
Tabla 11 Puntos definidos para la identificación en la planificación de ganancias.....	54
Tabla 12 rangos definidos para las ganancias .....	54
Tabla 13 Ganancias sintonizadas para el sistema anti-balanceo, movimiento x .....	68
Tabla 14 Ganancias sintonizadas para el sistema anti-balanceo, movimiento y .....	68

# ÍNDICE DE CÓDIGOS

Código 1 Planificación de ganancias: simulaciones y obtención de datos.....	56
Código 2 Planificación de ganancias: obtención de modelos lineales .....	56
Código 3 sintonización de los reguladores PID para la planificación de ganancias .....	58
Código 4 Algoritmo de control de la posición del carro mediante el doble lazo PID.....	77
Código 5 Algoritmo de planificación de ganancias para el cálculo de $K_p$ _P .....	78
Código 6 Programa para el cambio de referencias, cambio de las referencias de las posiciones .....	79



# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Según (Fundación ValenciaPort, 2012), las terminales portuarias de contenedores (TPCs) se establecen como nodos dispuestos para el intercambio modal en las redes de transporte . En ellos se producen tanto flujos de información como físicos mediante el uso de contenedores. Para poder realizar sus funciones se requiere una sólida infraestructura física e informática.

El funcionamiento básico de una terminal de contenedores, desde el punto de vista del intercambio físico, consiste en el traslado eficiente de los contenedores entre las diferentes áreas de la terminal, según sea conveniente. Como subsistemas fundamentales presentes en las TPCs cabe diferenciar: El subsistema de carga y descarga de buques, también conocido como zona de atraque, dotado de la infraestructura necesaria para la realización de las operaciones de carga y descarga de contenedores a los buques; el subsistema de recepción y entrega terrestre, donde se procede al intercambio de los contenedores entre los vehículos propios de la TPC y los medios de transporte terrestres externos, normalmente camiones o ferrocarriles; y los subsistemas de interconexión, mediante los cuales se produce el movimiento horizontal de los contenedores entre las diferentes zonas de la terminal.

El objetivo de la terminal portuaria de contenedores es maximizar la eficiencia de las actividades que se llevan a cabo dentro de ella. Para ello, es prácticamente indispensable la aplicación de técnicas de automatización sobre los diferentes elementos y equipos.

Dentro de la operativa de las terminales de contenedores, la gestión del patio de contenedores es una parte fundamental dentro del subsistema de recepción y entrega terrestre. Para llevar a cabo las operaciones de gestión de patio se pueden emplear diferentes tipos de vehículos y máquinas. Las máquinas más relevantes en la gestión de patio en la mayoría de las terminales portuarias de contenedores son las grúas pórtico. Este tipo de maquinaria se emplea casi exclusivamente para el almacenamiento de contenedores, mientras que se hace uso de otros tipos de vehículos para el transporte horizontal de los mismos. Las grúas pórtico trabajan sobre un conjunto de filas de contenedores sobre las que pueden depositar más o retirarlos. Son los equipos que más rendimiento de superficie y aprovechamiento del espacio proporcionan. Su precio es elevado y por este motivo se emplean en terminales donde el coste del suelo es alto o se tienen volúmenes de contenedores medios o grandes. Las grúas pórtico, a diferencia de las carretillas, son mucho más fáciles de automatizar, y precisamente este hecho está propiciando el uso extensivo de estos equipos en el norte de Europa, donde tradicionalmente se habían usado carretillas *straddle carrier*.

Las grúas pórticos se dividen en dos tipos, las RTGs (*Rubber Tyred Gantry Cranes*), las cuales se desplazan mediante neumáticos y las RMGs (*Rail-Mounted Gantry*), que se desplazan a través de raíles. Las grúas pórtico sobre raíles están experimentando un aumento de la cuota de mercado continua desde 2005, puesto que aportan un mayor aprovechamiento del patio y su automatización es mucho más natural. Sin embargo, la presencia de grúas RTG en la mayor parte de terminales de contenedores de todo el mundo hace especialmente relevante plantear sistemas de automatización de estos equipos para mejorar su rendimiento y aumentar su vida útil.

El presente trabajo se desarrolla precisamente atendiendo a esta necesidad. Se plantea un modelo dinámico simulado de una grúa RTG, sobre el cual se diseña un sistema de control completo de sus movimientos y una propuesta de aplicación de este control sobre las grúas RTG reales.

## 1.1 ANTECEDENTES

Este trabajo surge fruto de la realización de unas prácticas en colaboración con la Autoridad Portuaria de Valencia, a partir de ahora Valenciaport, su denominación comercial. Estas prácticas se enmarcan dentro de la Cátedra UPV-Valenciaport, cátedra con el objetivo de “impulsar la innovación y fomentar nuevas líneas de investigación y formación en el ámbito de la gestión portuaria” (UPV, 2023).

El trabajo principal asignado para esta práctica era estudiar el estado actual de las terminales portuarias de contenedores y proponer una mejora sobre cualquier ámbito logístico o maquinaria presente en la operativa de estas terminales. Tras la realización de un estudio preliminar se decidió escoger como propuesta de mejora la automatización de las grúas RTG presentes en la mayoría de las terminales portuarias de contenedores medianas y grandes. La selección de esta mejora tiene su justificación en las actuales tendencias de automatización en las terminales de contenedores. En los últimos años se observa que tanto la automatización de las puertas como la de equipos de patio tiene actualmente una tendencia al alza, lo cual se debe, entre otros factores, al interés creciente en la transformación digital y en la transición energética.

En el ámbito de la automatización o estudio de las grúas RTG existe poca cantidad de documentación al respecto. Las causas de esto se resumen principalmente en dos: la primera es que esta información forma parte del *Know how* de los fabricantes de grúas RTG, los cuales desarrollan sus propias técnicas de automatización y mejora de la vida útil de sus equipos, y, por otra parte, este estudio pertenece a un campo muy específico del conocimiento, sobre un tipo de máquinas muy concretas que solo tienen su uso dentro del transporte de contenedores en el patio de las terminales portuarias de contenedores.

El estudio más extenso realizado en el momento del desarrollo de este trabajo, en relación con las automatizaciones en el ámbito de las terminales portuarias de contenedores, se trata de una serie de monográficos realizados por la fundación Valenciaport dentro del proyecto de investigación bajo el nombre de MASPORT. El proyecto MASPORT tenía como finalidad “la consecución de un avance relevante en el conocimiento y la aplicación de las metodologías de automatización y simulación, que facilitaran la resolución de los cuellos de botella –marítimos y terrestres– y la mejora de la capacidad de las terminales portuarias de contenedores (TPCs), de su rendimiento y nivel de servicio” (Fundación Valenciaport, 2011). Este trabajo, tomará como referencia algunos de los elementos propuestos por este proyecto, sin embargo, solo como primer punto de partida, puesto que se trata de un estudio que plantea la automatización desde una visión generalista, sin centrarse en las particularidades de las técnicas de control, algoritmos, software de simulación y modelado, etc.

## 1.2 OBJETIVOS

En el presente trabajo los objetivos son los siguientes. Estudiar el estado actual de las automatizaciones y mejoras de las grúas RTG en las terminales portuarias de contenedores. A continuación, generar un modelo simulado realista de una grúa RTG tipo, a partir de toda la información disponible sobre las dimensiones y características de estos equipos. Este modelo se desarrolla como simulación primordial sobre la cual poder trabajar puesto que la realización de experimentos de identificación o validación de control sobre una grúa real no es asequible en la mayoría de los casos. Tras la obtención del modelo simulado se diseñará un sistema de control eficiente y adecuado para toda la operación de la grúa, el cual deberá ser validado. Por último, se propondrá la forma de la implementación de dicho algoritmo de control en los autómatas programables de la grúa real junto con la comunicación industrial requerida.

Con estos objetivos claros, se pueden establecer una serie de hitos a cumplir durante el desarrollo del trabajo, los cuales se han adelantado en el resumen. Estos son:

- Entendimiento y comprensión completa de las tendencias actuales en la automatización de las grúas RTG en la operación de patio de las terminales portuarias de contenedores.
- Desarrollo de un modelo simulado completo y realista de una grúa RTG que permita todos sus movimientos y operaciones.
- Diseño de un sistema de control de los movimientos en los 3 ejes del contenedor operado por la grúa RTG simulada.
- Planteamiento de una propuesta de implementación del algoritmo de control diseñado dentro del esquema de autómatas programables de las grúas RTG reales.
- Desarrollo de la comunicación industrial necesaria entre el sistema simulado y el autómata programable mediante el protocolo de comunicaciones industriales Modbus, simulando la comunicación real entre el esquema de autómatas y la grúa reales.
- Validación de la propuesta de control, así como de la simulación planteada mediante diferentes tipos de ensayos y una secuencia de recogida y depósito de un contenedor entre dos puntos del patio.

## 1.3 DESCRIPCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Teniendo en mente los objetivos descritos anteriormente, se establece la estructura del presente trabajo. Esta estructura, basada en capítulos, se plantea de forma que en cada uno de estos se desarrollen las tareas pertinentes para lograr la consecución de los mencionados hitos. Los capítulos que componen este trabajo de fin de máster, excluyendo el capítulo introductorio son:

- **CAPÍTULO 2: ESTUDIO PRELIMINAR DEL ESTADO DE LA AUTOMATIZACIÓN EN LAS TPCS**

En este capítulo se desarrolla un trabajo fundamental de investigación sobre el funcionamiento de las terminales portuarias de contenedores, las máquinas y vehículos que intervienen en las diferentes operativas y el estado actual de las automatizaciones de los equipos de patio.

- **CAPÍTULO 3: MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA GRÚA**

Se reserva este capítulo para la realización de las tareas de estudio del funcionamiento y características de una grúa RTG tipo y la generación del modelo simulado de la misma mediante el software adecuado.

- **CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL**

Capítulo dedicado al diseño de un sistema para controlar los movimientos de la grúa simulada, con la intención de proponer un diseño de control válido, eficiente y robusto, para su extrapolación a las grúas RTG reales.

- **CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL**

Se explicará en este capítulo la forma de implementar el diseño de control propuesto en un autómata programable real y se simulará la conexión de este autómata con el sistema de la grúa simulada.

- **CAPÍTULO 6: COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS**

Se plantea la forma en la que se debería realizar la comunicación entre el conjunto de autómatas programables disponibles en las grúas RTG reales con la propia grúa para la correcta consecución del control planteado.

- **CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

El último capítulo de este trabajo sirve como conclusión sobre todas las tareas realizadas, así como de punto de discusión sobre posibles mejoras y ampliaciones. Se desarrolla también en este capítulo la relación entre el trabajo realizado y los Objetivos de desarrollo sostenible.



# CAPÍTULO 2: ESTUDIO PRELIMINAR DEL ESTADO DE LA AUTOMATIZACIÓN EN LAS TPCS

## 2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo sirve de punto de partida para el resto del trabajo desarrollado. Se muestra a lo largo de este estudio preliminar una visión del estado general actual de las terminales portuarias de contenedores, estudiando de lo general a lo particular cuales son las tendencias de automatización y los equipos empleados hoy en día en los puertos de todo el mundo y su funcionamiento. Tras esta revisión se estudiará el estado de un tipo de máquinas en concreto, las grúas RTG.

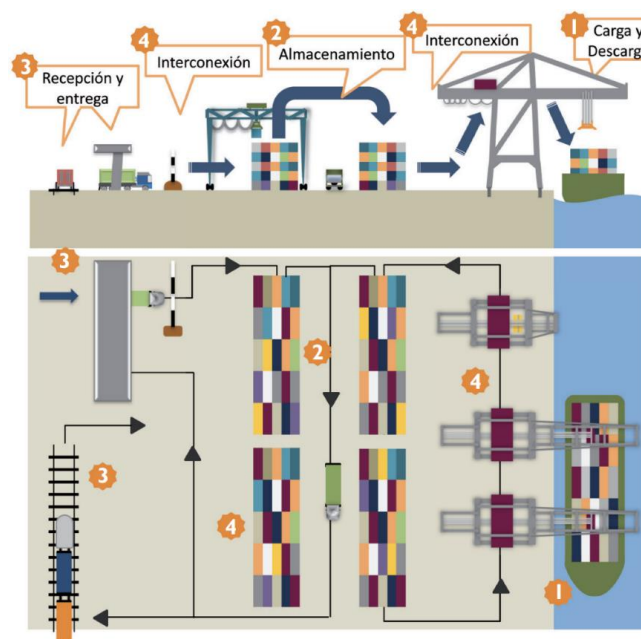
## 2.2 ESTRUCTURA

Este capítulo se divide en 3 subapartados diferenciados. En el primero de ellos se describe de forma general la forma, estructura y subsistemas de una terminal portuaria de contenedores. El segundo apartado muestra en detalle el subsistema de almacenamiento, en concreto el patio de contenedores, mostrando las diferentes máquinas y vehículos que trabajan en él. Y, por último, se revisará el estado de la automatización en las terminales, poniendo el foco sobre las máquinas presentes en el patio de contenedores, y, en concreto, se tratará la problemática asociada a la automatización de las grúas RTG.

## 2.3 RESUMEN Y ESTRUCTURA DE LAS TPCS

En la introducción de este trabajo ya se han comentado los diferentes subsistemas presentes en las terminales portuarias de contenedores. Estos sistemas están interconectados entre sí, siendo cada uno de ellos fundamental para el correcto funcionamiento de la terminal en su conjunto. Un esquema del conjunto de subsistemas presentes en las TPCs puede observarse en la Figura 1.

**Figura 1 Subsistemas de una terminal de contenedores (Fundación ValenciaPort, 2012)**



A continuación, se describe de forma breve cada uno de los subsistemas, según la información disponible en (Fundación ValenciaPort, 2012):

- Subsistema de carga y descarga

Este subsistema cuenta como equipamiento principal con grúas de muelle, las cuales se encargan de cargar y descargar los buques dispuestos en el muelle.

- Subsistema de almacenamiento de contenedores

Es el que ocupa la mayor parte de la superficie de la terminal portuaria. Su objetivo es el depósito temporal de los contenedores, pudiendo así ajustar las variaciones entre las entradas y salidas de estos y adaptarse a las diferencias de capacidad de los diferentes medios de transporte. Estos medios de transporte pueden ser buques, los cuales realizan pocas escalas, pero presentan grandes movimientos de contenedores; ferrocarriles, también con pocos viajes a la terminal, pero gran movimiento de mercancías, aunque mucho menor que los buques; y camiones, con poca cantidad de contenedores transportados, dos como mucho, pero de manera muy frecuente.

- Subsistema de recepción y entrega terrestre

Esta es la parte de la terminal destinada a transferir los contenedores entre los medios de transporte externo, los camiones o el ferrocarril, y la terminal.

- Subsistema de interconexión

Está dedicado al transporte horizontal de los contenedores trasladándolos a las diferentes partes de la TPC interconectando el resto de los subsistemas. Este subsistema engloba tanto el equipamiento empleado para mover los contenedores, así como todas las herramientas de transmisión de información necesarias.

## 2.4 EL SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Tras el breve estudio de los diferentes subsistemas de las terminales portuarias de contenedores, este apartado se centrará en el subsistema de almacenamiento, entendiendo su funcionamiento y equipamiento.

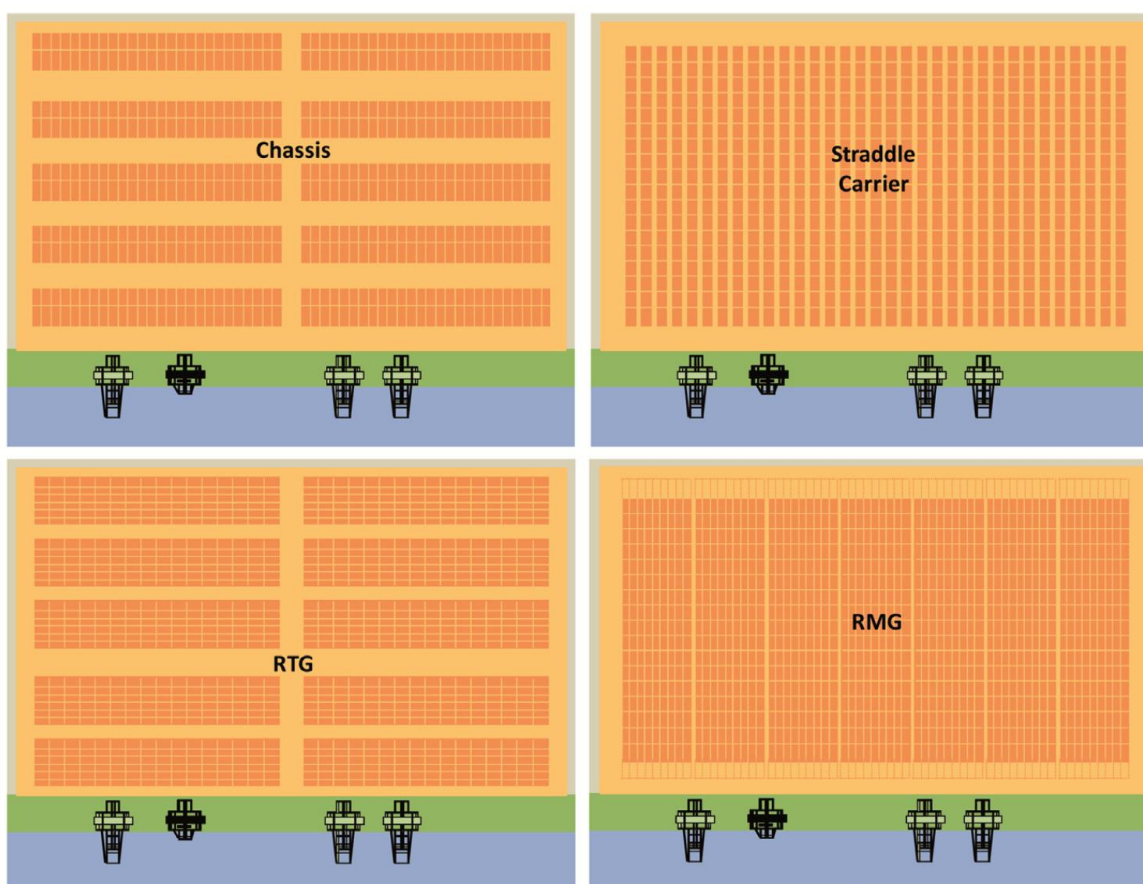
Una de las características más relevantes del subsistema de almacenamiento es que su forma y extensión depende del tipo de maquinaria empleada para el movimiento de los contenedores, entre otros factores, como son el volumen de tráfico de la terminal o la lógica operacional. De la combinación de estos factores surge la forma concreta del *Layout* del patio de contenedores.

En el patio de contenedores, los equipos más empleados son: Chasis o plataformas, carretillas, *Reachstackers*, *Straddle carriers*, RTGs y RMGs. La Figura 2 muestra la disposición concreta del patio en función del tipo de maquinaria empleada. Se resumen a continuación las características más relevantes de cada tipo de equipo.

En aquellos patios que emplean plataformas, los contenedores se disponen encima de ellas, y, a la hora de su traslado, se remolcan mediante cabezas tractoras. Esta combinación entre la cabeza tractora y remolque forma el equipo de transporte horizontal.

Las carretillas son vehículos capaces de elevar y trasladar los contenedores permitiendo su apilamiento. Existen multitud de tipos de carretillas y son equipos con gran flexibilidad, pero con una capacidad de automatización muy reducida. Normalmente se emplean como equipo de apoyo.

Figura 2 Configuraciones del área de almacenamiento según el equipo de patio, (Fundación ValenciaPort, 2012)



Los vehículos *Reachstackers* son máquinas altamente versátiles, puesto que se pueden emplear tanto para el almacenamiento de los contenedores en el patio, como para el transporte interno o la entrega y recepción de los contenedores en camiones o ferrocarril. Son vehículos parecidos a las carretillas que cuentan con una pluma telescópica, desde la que queda suspendido un *spreader*, el cual permite alcanzar contenedores situados a gran altura.

Los *straddle carriers* son un tipo de carretillas pórtico. En estos vehículos el contenedor se suspende entre sus patas a horcadas y en paralelo a la dirección de su movimiento. Al igual que los *Reachstackers* estos equipos presentan una alta versatilidad.

Por último, quedan las grúas pórtico RTG y RMG. Como breve introducción a las grúas pórtico se debe comentar que estas son sistemas preparados para apilar contenedores, tanto dentro del patio de contenedores como en medios de transporte internos o externos. Estos medios de transporte pueden ser camiones, AGVs (*Automatic Guided Vehicle*), plataformas, etc. Las grúas pórtico son las máquinas que presentan un mayor aprovechamiento del espacio, y, además presentan grandes facilidades en su automatización.

Según el tipo de sistema mediante el que se trasladen, las grúas pórtico pueden ser *Rubber Tyred Gantry Cranes* (RTG, sobre neumáticos) o *Rail Mounted Gantry Cranes* (RMG, sobre raíles), Siendo los RMG los equipos con mayor aprovechamiento del espacio.

Puesto que en el capítulo 3 se presenta de forma extensa la definición y características de las grúas RTG, se dedica el siguiente párrafo al estudio de las diferencias principales entre las grúas pórtico RTG y RMG.

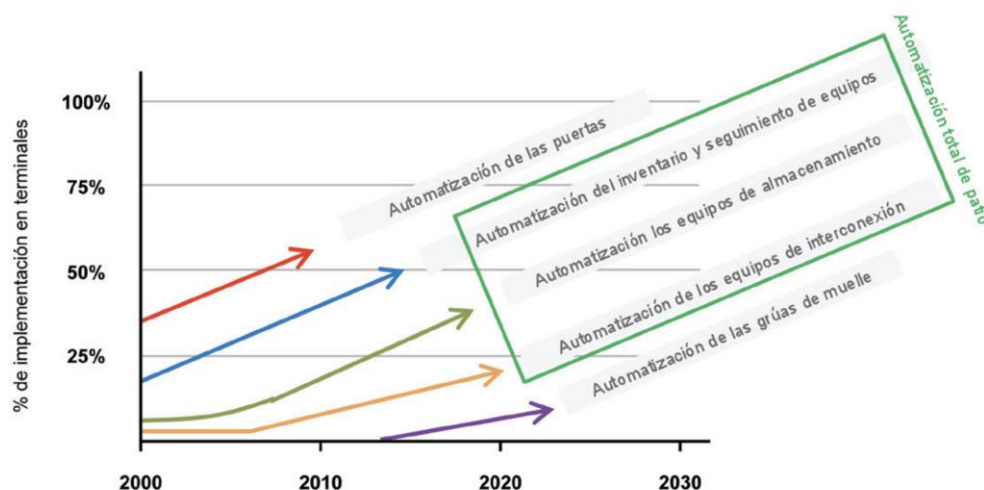
Aparte de la diferencia fundamental de su método de traslación, las grúas RMG son en general más grandes y presentan una mayor densidad de patio con respecto a las RTG. Además, también tienen una mayor velocidad de traslación. En cuanto al mantenimiento de los equipos, este es más sencillo en las grúas RTG. También debe mencionarse que la flexibilidad, tanto ante un cambio de *Layout* como ante cambios de calle, es mucho mayor en las grúas RTG que en las RMG. Por último, la automatización de las grúas RMG es mucho más sencilla que la de las grúas RTG. Este hecho es principalmente debido a que el desplazamiento sobre carriles facilita de gran manera esta automatización, al tener menos grados de libertad que hagan necesarios sistemas de direccionamiento automático. Las innovaciones dirigidas a las grúas RMG se centran en la automatización completa de todos sus movimientos mientras que las automatizaciones que suelen realizarse sobre las grúas RTG se centran en pequeñas mejoras y automatizaciones parciales progresivas.

## 2.5 AUTOMATIZACIONES SOBRE EL PATIO DE CONTENEDORES Y LAS GRUAS RTG

Tras esta pequeña revisión de los equipos de patio y el resumen de las diferencias entre los dos tipos de grúas pórtico se estudia ahora el estado de las automatizaciones en los patios de contenedores, y, en particular de las grúas RTG.

En la Figura 3 se aprecia la evolución en los últimos años de las tendencias en la automatización de terminales de contenedores. Se observa que tanto la automatización de las puertas como la de equipos de patio tiene actualmente una tendencia al alza, lo cual se debe entre otros factores al interés creciente en la transformación digital y en la transición energética.

**Figura 3 Tendencias en la automatización de TPCs (Fundación ValenciaPort, 2012)**



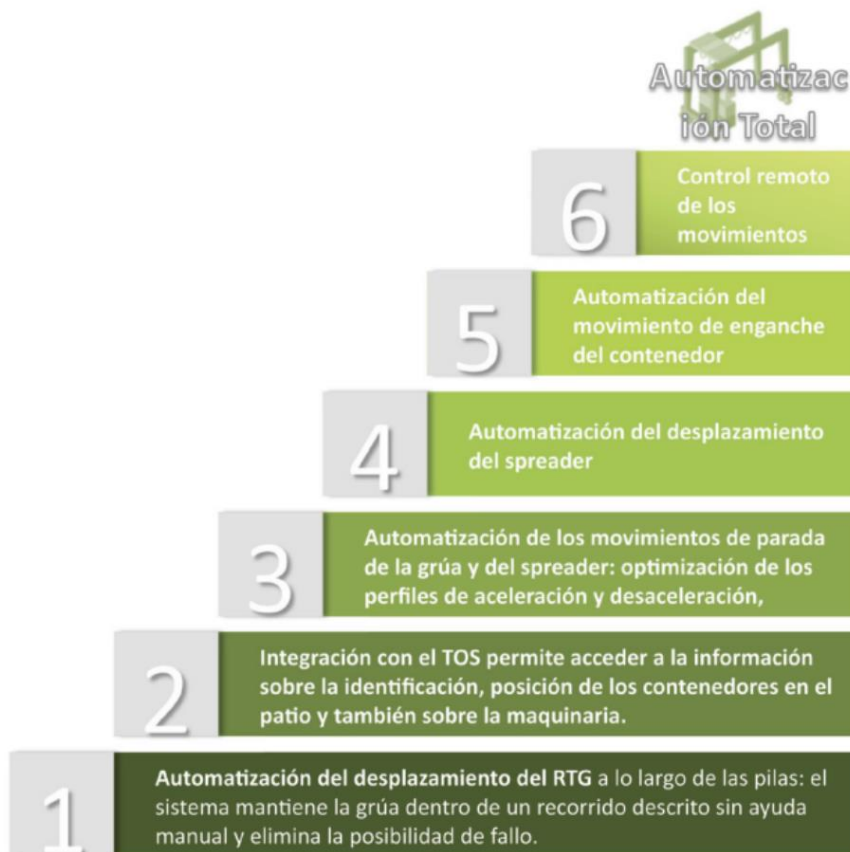
Dentro de estas automatizaciones de los equipos de almacenamiento se encuentran las técnicas de automatización de las grúas RTG. Estas técnicas son fundamentales para la mejora de las prestaciones de estas máquinas, el aumento de la seguridad, el ahorro de costes, el ahorro energético y el aumento

de la vida útil. Las automatizaciones de las grúas RTG se aplican mediante técnicas conocidas como *retrofitting*.

El *retrofitting* consiste en una técnica de renovación de instalaciones basada en la actualización y mejora de componentes o accesorios. Esta técnica es ampliamente empleada en las TCPs debido al gran coste económico de los equipos portuarios. El *retrofitting* aplicado a la automatización, consiste en la automatización de un equipo modificando componentes existentes o añadiendo nuevos. El *retrofitting* es considerado una excelente opción para conseguir la automatización o semi-automatización de equipos a lo largo de su vida útil, pudiendo tener en consideración aspectos económicos y financieros con respecto a sus valores residuales, el propio coste del retrofitting, el del coste perdido por la parada de los equipos, etc.

En concreto, la aplicación del retrofitting sobre las grúas de patio puede estructurarse como un proceso en seis fases, en cada una de las cuales se consigue un objetivo a través de la aplicación de semi-automatizaciones hasta conseguir la automatización completa al final de este proceso. La Figura 4 muestra en detalle la estructura del proceso comentado.

**Figura 4 Retrofitting para la automatización de RTGs (Fundación ValenciaPort, 2012)**



Puesto que es fundamental la automatización de los equipos RTG, se plantea en este trabajo la propuesta de un sistema de control de la posición de los contenedores trasladados por estas máquinas. De esta forma se mejoraría el desempeño de la grúa, aumentando su vida útil y reduciendo gastos asociados con la compra de una nueva grúa, reduciendo emisiones y aumentando la seguridad al conseguir unos movimientos no dependientes de la pericia de los operarios.



# CAPÍTULO 3: MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA GRÚA

## 3.1 INTRODUCCIÓN

Con toda la información presentada en el capítulo anterior sobre la importancia de la automatización de los diferentes elementos de las terminales portuarias de contenedores, y, en particular, de las grúas RTG, se plantea ahora la realización de un modelo simulado realista de un equipo de grúa RTG basado en las características típicas de estos equipos. Esto tiene como objetivo fundamental facilitar las tareas de automatización de estos equipos puesto que no es fácil ni asequible en muchos casos trabajar sobre grúas RTG reales para identificar su comportamiento frente a la manipulación de sus entradas, plantear diseños de sistemas de control que se puedan aplicar directamente o realizar validaciones de estos sistemas. Es por ello por lo que es un paso natural y lógico el crear un gemelo digital de la planta de la grúa RTG para poder trabajar sobre ella y extraer conclusiones sobre lo que ocurrirá sobre una grúa real.

Cabe destacar, que ningún modelo es perfecto, y, por tanto, debe tenerse en cuenta que la simulación no representa la realidad a la perfección. Deberán existir simplificaciones que permitan la ejecución de la simulación en un computador. Debido a esto, un modelo no podrá tener en cuenta la infinidad de variables reales que afectan al comportamiento de un sistema real. A pesar de esto, el modelo planteado se propone de forma que respete al máximo el comportamiento real del sistema.

## 3.2 ESTRUCTURA

Para organizar esta capítulo, se plantean diversos subapartados. En el primero de ellos se estudia el funcionamiento global de la grúa RTG según las partes que la componen. En el segundo, se muestran las características fundamentales de una grúa tipo con sus valores, para tener toda esta información en cuenta a la hora de generar el modelo simulado. El tercer subapartado planteará un modelo físico-matemático del sistema fundamental que compone el movimiento de la grúa en sus dos ejes principales: un carro con péndulo. Tras el análisis de este sistema, en el cuarto subapartado se modelará mediante el software Simscape multibody, dentro de Simulink, el gemelo digital de la grúa RTG. Y, por último, en el quinto subapartado se simulará el efecto en el modelo de la grúa la aplicación de diferentes entradas para comprobar que el comportamiento es el adecuado.

## 3.3 ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA GRÚA RTG

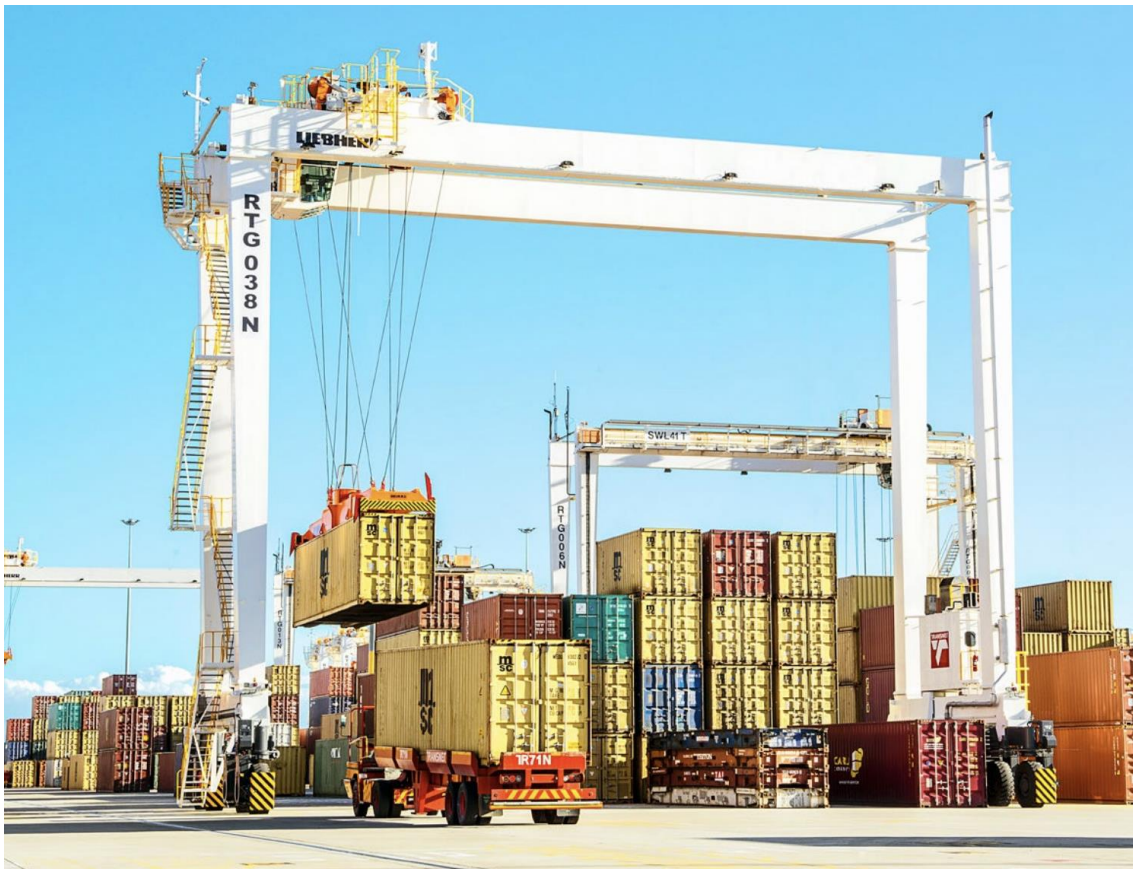
Una grúa RTG se define como una grúa sobre neumáticos autopropulsada por un motor de explosión que se desplaza en trayectorias rectilíneas a través de las pilas de contenedores que se forman entre sus patas. Estas grúas también tienen la capacidad de trasladarse entre distintas pilas de contenedores haciendo uso de un sistema de giro de sus ruedas, giro que se realiza sobre superficies especiales para evitar el desgaste de los neumáticos.

Al igual que todos los equipos de patio, las grúas RTG determinan un *Layout* específico. En este caso, la forma en la que se disponen generalmente los contenedores es en forma de pilas paralelas al cantil, separadas una distancia suficiente para permitir el movimiento de los vehículos de transporte

horizontal. Para permitir el desplazamiento perpendicular a las pilas, cada cierta longitud aparecen huecos entre las mismas.

Las dimensiones concretas de las pilas dependen del equipo empleado. Además, también existen preferencias según el área geográfica, mientras que en las terminales europeas las pilas suelen ser de 3 o 4 alturas con 6 contenedores por bloque más un carril reservado para la carga y descarga para los vehículos de transporte horizontal, en los puertos asiáticos es común encontrar anchos de 13 contenedores y alturas superiores a 6 contenedores. En la Figura 5 se muestra una imagen de una grúa RTG realizando su operación sobre un bloque de contenedores.

**Figura 5 Grúa de patio RTG (Konecranes, s.f.)**



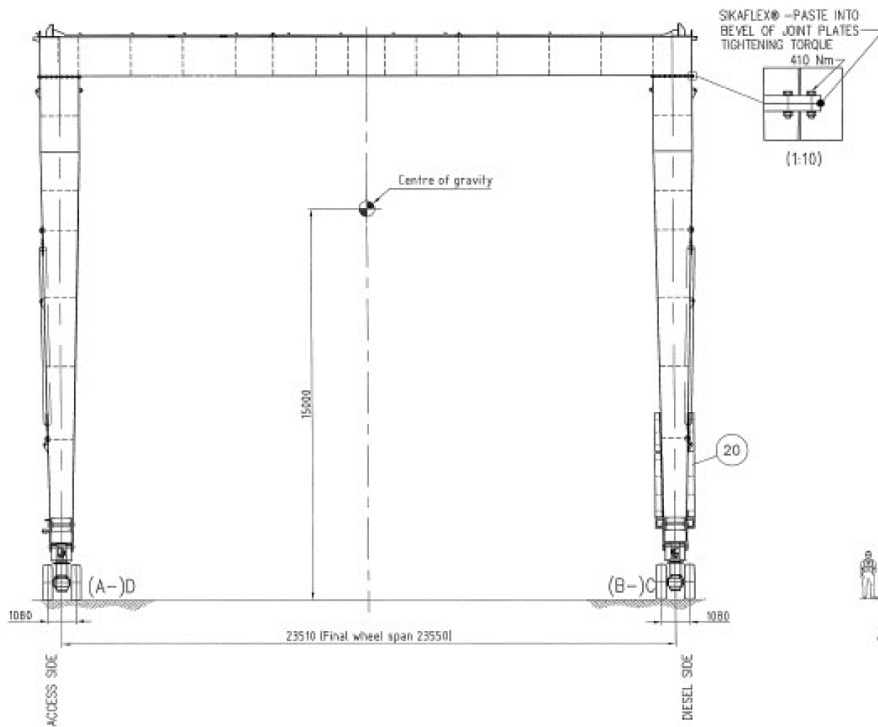
A continuación, se llevará a cabo un minucioso análisis de las partes y características de una grúa RTG. Este análisis se llevará a cabo sobre una grúa tipo concreta. El modelo seleccionado es una grúa RTG de la marca Konecranes, con un motor diésel de 610 kVA, 8 motores AC para la translación, 2 motores AC para la elevación, más otros cuatro para el control de peso, 4 motores AC para la translación del carro y 4 motores AC auxiliares para la elevación. Este estudio se realizará atendiendo a las partes fundamentales de estos equipos, y estará basado en el trabajo realizado por (Villodres Martín, 2017). Dicho trabajo está dedicado al estudio del sistema eléctrico y de mantenimiento de estas grúas

### ***3.3.1 Estructura pórtico***

La estructura pórtico consta de dos grandes vigas unidas a las patas a ambos lados. El pórtico cuenta con un riel soldado en cada una de las dos vigas que permite el desplazamiento del carro. Como freno mecánico en caso de emergencia, el pórtico dispone de rampas en los extremos de los rieles.

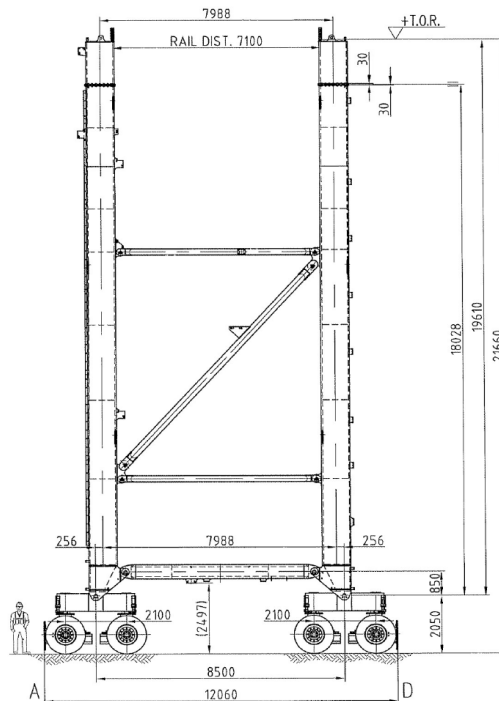


**Figura 6 Vista perfil de un RTG (Konecranes, s.f.)**



Cada una de las patas tiene una viga durmiente horizontal, la cual se encuentra en la parte inferior de estas. Además, para aumentar la rigidez del pórtico, las grúas cuentan con vigas de arriostamiento que unen las patas, normalmente tres a cada lado.

**Figura 7 Vista frontal de un RTG (Konecranes, s.f.)**



### 3.3.2 Bogies

Se define como bogie al conjunto de dos ruedas que se disponen sobre un mismo eje. En este componente se encuentra toda la maquinaria necesaria para el movimiento de las ruedas: motor, frenos, reductora, etc. Además, cuenta con mecanismo conocido como *pivot locking* para bloquear las ruedas en su posición

**Figura 8 Bogie (Konecranes, s.f.)**



En la Figura 8 se aprecian en detalle los componentes concretos del bogie, los cuales son:

1. Eje
2. Caja reductora
3. Motor eléctrico
4. Caja de conexiones del motor
5. Rueda activa
6. Rueda inactiva

La grúa RTG está soportada por ocho bogies en total, dos por cada extremo del pórtico. En medio de cada par de bogies existe un elemento conocido como balancín compensador, cuya función es conseguir que ambos bogies soporten el mismo peso.

Los motores de los bogies son controlados mediante cuatro variadores de frecuencia ubicados en la sala de comandos eléctricos. Se tienen dos variadores de frecuencia por lado del pórtico, según la Figura 6 y la Figura 7, en el lado A-D se encuentran los dos variadores para el lado de la escalera de acceso, y en el lado B-C se encuentran los otros dos variadores para el lado del diésel. Los movimientos a izquierda y derecha de la grúa se controlan por medio de un joystick en la cabina del operador, en estos movimientos los actuadores actúan de manera simultánea, sin embargo, si se requieren pequeñas correcciones en el movimiento transversal mientras se desplaza la grúa, los motores A-D y B-C actúan con pequeñas diferencias de velocidad entre ellos. Como medida de protección eléctrica, los bogies cuentan con un disyuntor que interrumpe el paso de corriente si se excede un determinado valor de intensidad.

En medio de cada par de bogies existe un elemento conocido como balancín compensador, cuya función es conseguir que ambos bogies soporten el mismo peso.

Los motores con los que cuenta la grúa RTG son trifásicos de inducción, y se encuentran acoplados de forma horizontal al eje de la reductora. En el lado opuesto al motor se dispone el freno mecánico de disco. Mediante este freno se evita el movimiento de la grúa cuando los motores están parados. Este freno es accionado continuamente por un muelle, y solo se libera en caso de que actúe un campo electromagnético al activar el suministro de energía que alimenta una bobina de solenoide.

Cada bogie tiene una rueda activa y una inactiva. El eje saliente de la caja de engranajes genera un extremo impulsor con el cubo de la rueda, que es montado sobre el mismo, y otro extremo inactivo que no posee tracción. El cubo de la rueda de la parte inactiva dispone de dos cojinetes de rodillo permitiendo el giro libre de la rueda.

El sistema *pivot locking* comentado anteriormente está montado en el balancín compensador, y consiste en una estructura de acero con orificios por los cuales puede insertarse un pasador que baja atravesando la caja reductora, la cual se encuentra por encima de la estructura, y por debajo del motor reservado para el *pivot locking*, tal como se observa en la Figura 9.

**Figura 9 pivot locking (Villodres Martín, 2017)**

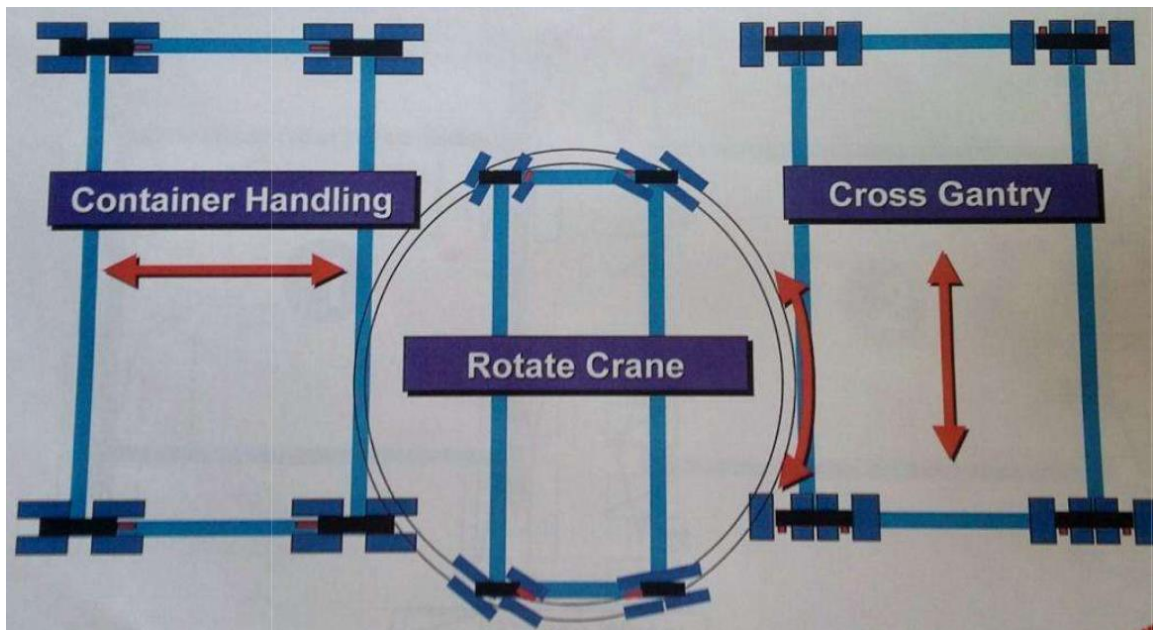


Gracias al sistema *pivot locking* se pueden fijar diferentes posiciones de las ruedas, estas son:

- Posición de desplazamiento longitudinal
- Posición de desplazamiento transversal
- Posición de desplazamiento con ángulo (empleada en el giro)
- Posición *Parking*

Gracias a estas posiciones se pueden conseguir distintos movimientos de la grúa. En la Figura 10 se aprecian estos movimientos

Figura 10 Movimientos del pórtico según la posición de las ruedas (Konecranes, s.f.)



En la posición de parking, en cada pata se orienta el bogie interno en posición de desplazamiento longitudinal, y el bogie externo en posición de desplazamiento transversal, bloqueando el movimiento de la grúa. Esta posición es especialmente útil ante condiciones meteorológicas desfavorables.

Cuando se realiza un desplazamiento transversal, los motores se combinan por pares, agrupando los cuatro motores relativos a cada lado a un mismo variador.

Para el control de los desplazamientos se emplea un PLC (*Programmable Logic Controller*) junto con sensores de tipo *encoder*. Este sistema de control, el cual se ubica en el eje del bogie evita el giro de este mas de 90°.

### 3.3.3 Carro

El carro está formado por cuatro componentes principales: la estructura principal, dos soportes móviles y la cabina del operador.

En la estructura principal se encuentran todos los elementos que permiten posicionar la maquinaria de polipastos y los seis cabrestantes, dos de elevación y cuatro de la maquinaria de control auxiliar.

Los soportes móviles están debajo de la estructura principal, unidos mediante bridas emperradas a los laterales. En cada soporte móvil se encuentran dos ruedas del carro, dispuesta cada una en un extremo.

El carro se desplaza sobre las dos vigas puente mediante cuatro ruedas. Al igual que las ruedas de los bogies, estas también son accionadas mediante motores de inducción. Además, las ruedas cuentan con freno de disco y reductora. La Figura 11 muestra en detalle el motor del carro y el eje reductor.

**Figura 11 Motor del carro (derecha) desacoplado del eje reductor (izquierda) (Villodres Martín, 2017)**



De la reductora sale un eje hueco que se acopla sobre el eje enchavetado de la rueda del carro.

El motor se acopla directamente a la caja de engranajes. En el lado contrario a la transmisión del motor se encuentra el freno de disco, el cual es accionado por la fuerza de un muelle que frena el motor. Al igual que en el bogie, para liberar el freno se aplica un campo magnético al alimentar una bobina de solenoide cuando se quiera mover el carro.

Para la obtención de la relación velocidad/posición del carro en el extremo de cada motor de desplazamiento se cuenta con un encoder.

Los cables que suministran la electricidad a los motores se disponen en mecanismo plegable con una cadena portacables, estando uno de los extremos de la cadena unido al carro. En la Figura 12 se muestra la forma de estas cadenas portacables.

**Figura 12 cadena portacables (Conectronica, 2020)**



Los contactores, disyuntores, unidades de entrada/salida remota del PLC y equipos de medición y monitoreo se encuentran protegidos de la lluvia en un cuadro situado en la parte superior del carro.

Para tener la mejor visibilidad posible por parte del operario tanto el suelo como parte de las paredes de la cabina son de vidrio diáfano.

Dentro de la cabina encontramos todos los mandos y controles necesarios para la manipulación de la grúa RTG. Estos mandos son dos *joysticks* para las funciones de desplazamiento del pórtico, elevación y carro. El movimiento de los *joysticks* se traslada al PLC mediante potenciómetros. La información de los movimientos de los *joysticks* se codifica con ocho bits consiguiendo un grado de intensidad en una escala de 0 a 255.

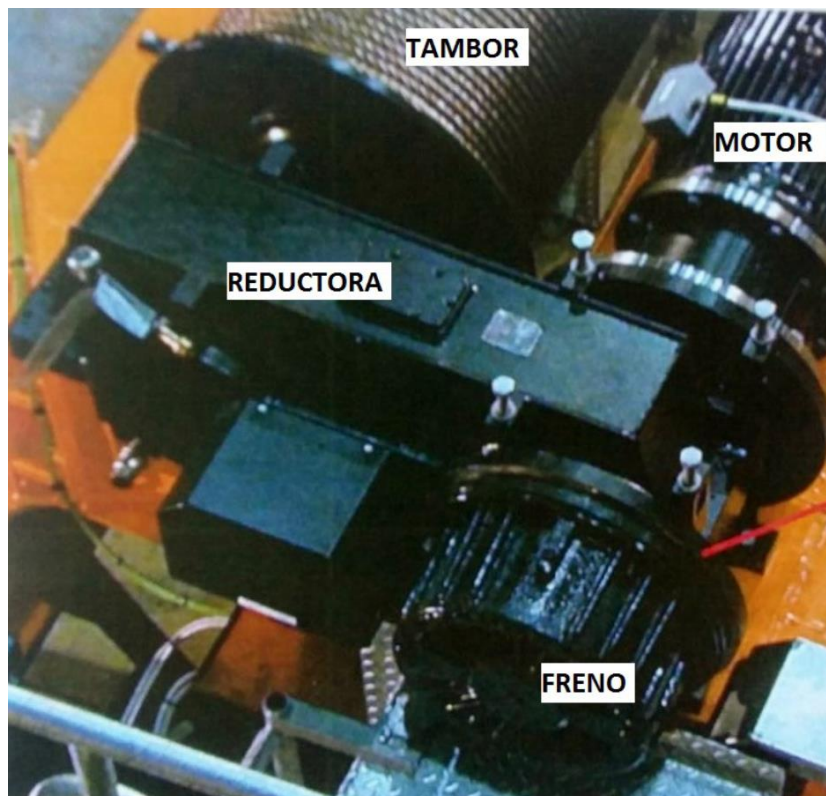
### 3.3.4 Sistema de elevación

Para describir este sistema se desarrollará en detalle la explicación de sus elementos fundamentales, a saber: polipastos, cables auxiliares y spreader.

#### 3.3.4.1 Polipastos

Los polipastos son el elemento fundamental para la elevación de los contenedores. Están formados por el tambor de elevación, el motor de inducción, la reductora y el freno mecánico. La Figura 13 muestra en detalle los elementos del polipasto.

**Figura 13 Elementos del polipasto (Villodres Martín, 2017)**



El polipasto cuenta con dos elementos cruciales: el encoder y las levas. Gracias a estos elementos se evitan colisiones accidentales del spreader con el suelo o la cabina. El encoder permite conocer la posición del spreader mientras que las levas actúan como elemento capaz de enviar señales para detener o reducir la velocidad del mismo.

El encoder se encuentra en el extremo del eje del tambor, y convierte el giro mecánico en impulsos digitales que envía al PLC. Este encoder es de tipo incremental.

Mediante un engranaje, un eje con las levas rota conjuntamente con el tambor. El accionamiento de cada leva representa una altura concreta diferente del spreader, estas alturas son:

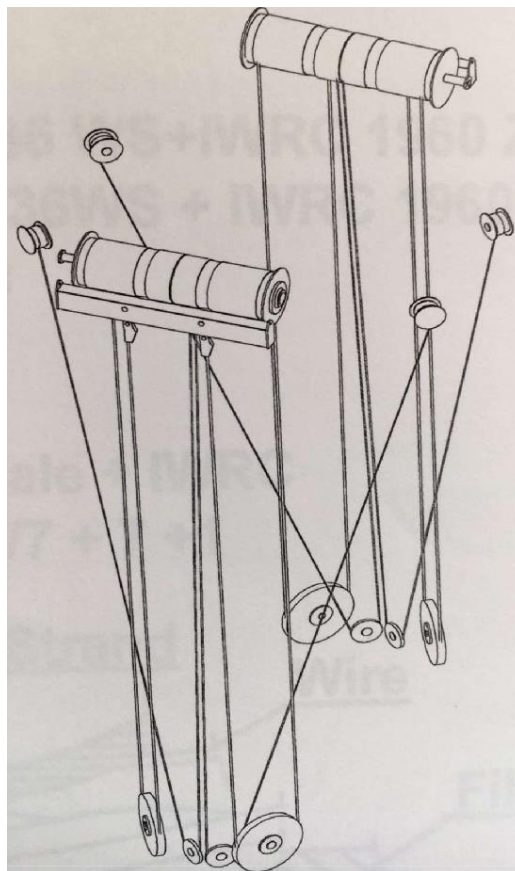
- Altura límite abajo
- Altura de calibración
- Altura límite superior
- Altura límite superior de emergencia

Estas alturas además pueden ajustarse realizando un ajuste sobre las levas.

En cuanto al tambor, este cuenta con cuatro surcos en espiral, estando dos de ellos maquinados en direcciones opuestas. Los surcos que se encuentran en la parte exterior están reservados para los cables de elevación mientras que los interiores son para los cables auxiliares. La Figura 14 muestra de forma esquemática el cableado principal y auxiliar del polipasto. Los cables de elevación salen del tambor, pasan por las poleas del bastidor de anclaje, y vuelven al tambor, concretamente a los conectores de extremos. Estos conectores son elementos que mediante una cuña estrangulan al cable por su propio peso, además cuentan con un sensor de carga. En cuanto a los cables dispuestos en el interior del tambor, estos también salen del tambor para ir a otras poleas dispuestas en el bastidor de carga, sin embargo no vuelven al tambor, sino a un cabrestante auxiliar.

Por último, cabe mencionar, que, tal como se aprecia en la Figura 14, un extremo del tambor es el que se une con el eje de la caja reductora mientras que el otro extremo está apoyado sobre un soporte con un cojinete

**Figura 14 Sistemas de cableado del polipasto: principal y auxiliar (Villodres Martín, 2017)**



### 3.3.4.2 Cables auxiliares

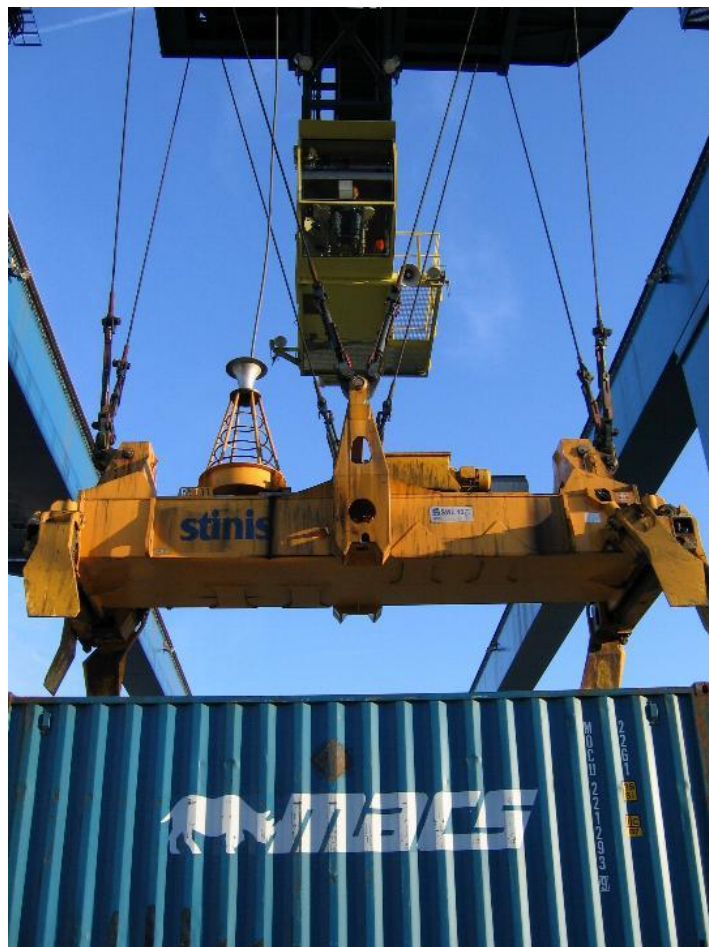
La función de los cables auxiliares es impedir el movimiento horizontal de la carga suspendida. Como se observa en la Figura 14, la grúa RTG cuenta con cuatro cables auxiliares. En las operaciones de elevación, de desplazamiento del carro y de desplazamiento del pórtico, los cabrestantes auxiliares a los que llegan estos cables los mantienen tensos para evitar la oscilación de la carga. Como función adicional, ajustando los momentos que ejercen cada uno de los cuatro cables se pueden minimizar también las pequeñas oscilaciones verticales de la carga.

Los cabrestantes auxiliares se sitúan en el carro, por pares, dos en cada extremo, dotando a los cables de un ángulo adecuado. Estos cabrestantes se componen de los mismos elementos que los polipastos: un tambor, un motor, una reductora y un freno. El tambor del cabrestante auxiliar también cuenta con surcos en espiral, con la diferencia de que ahora son todos en el mismo sentido. El equipo que controla el sistema de los cabrestantes auxiliares está situado en la sala eléctrica.

### 3.3.4.3 Spreader

El spreader es el sistema elevador que se dispone entre el carro y la carga, y su función es enganchar y desplazar vertical y horizontalmente esta carga. La Figura 15 muestra un spreader situado cerca de un contenedor, el spreader de la imagen cuenta además con un sistema de aletas, conocidas como *flippers*, que al cerrarse permiten el centrado del spreader al contenedor. Estas aletas son controladas desde la cabina y pueden cerrarse hacia arriba o hacia abajo.

**Figura 15 Spreader con aletas (Cornelissen, s.f.)**





Las grúas pórtico RTG cuentan en la actualidad con spreaders telescópicos, que permite ajustar su longitud al tamaño del contenedor, según sea de 20, 30, 40 o 45 pies. Además, también son capaces de elevar dos contenedores al mismo tiempo mediante un sistema denominado *twin*.

El spreader es capaz de acoplarse a las esquinas del contenedor gracias al sistema de *twistlocks*, cerrojos giratorios. Los *twistlocks* son elementos estandarizados para fijar los contenedores a una caja móvil en buques portacontenedores, camiones o trenes, así como para facilitar la operativa de los equipos de patio en las terminales de contenedores. La Figura 16 muestra en primer plano un *twistlock* abierto, y en segundo plano la esquina de un contenedor fijado a la cubierta del buque mediante un *twistlock* cerrado.

**Figura 16 Twistlocks en la cubierta de un buque portacontenedores (Cozanet, s.f.)**



El spreader está formado por un bastidor rectangular de acero y de un sistema hidráulico compuesto por los siguientes elementos:

- Depósito hidráulico
- Bomba de pistón
- Motor eléctrico
- Válvula
- Filtro

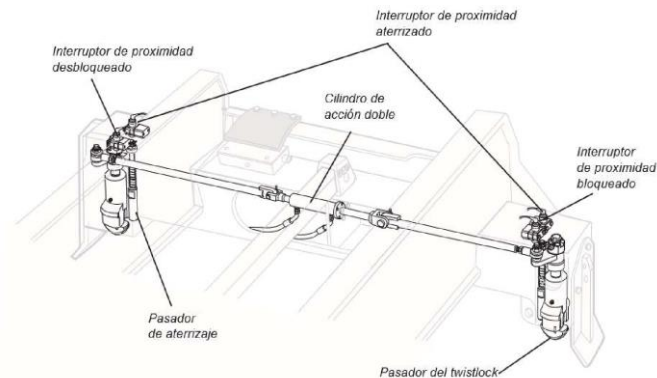
Todos estos elementos se encuentran montados sobre amortiguadores de caucho dentro del bastidor de acero y van protegidos con cubiertas.

La bomba de pistón se acciona mediante el motor eléctrico, el cual es trifásico de jaula de ardilla.

El modo telescópico del *spreader*, así como los *twistlocks* se accionan de forma hidráulica controlados con electroválvulas, las cuales tienen la capacidad de ser accionadas manualmente en caso de fallo.

Los *twistlocks* se accionan gracias a un pistón de doble efecto situado en las vigas laterales. El sistema de anclaje de los *twistlocks* está formado por dos partes: Un pasador largo, que es el extremo de contacto, y un cilindro. El *spreader* cuenta con dos pistones de doble efecto, cada uno en una de las vigas laterales y cada uno activa los dos *twistlocks* de ese lado. Al accionar el pistón para abrir el *twistlock*, esta gira sobre sí mismo quedando encajado dentro de la cantonera de la esquina del contenedor. Este sistema de *twistlocks* en las vigas laterales puede verse en detalle en la Figura 17.

**Figura 17 Sistema de twistlocks en una viga lateral (Konecranes, s.f.)**

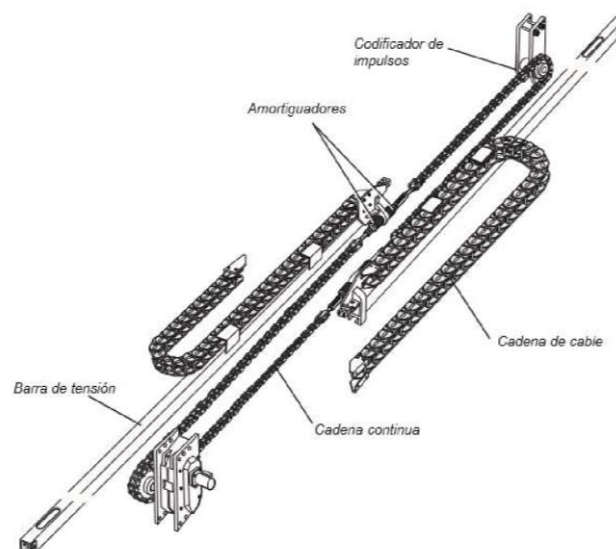


La posición de los *twistlocks* queda indicada en la cabina mediante lámparas. También se indica si el *spreader* se encuentra apoyado en el contenedor.

Todo el equipo del *spreader*, los sistemas de cadenas de cable y la centralita hidráulica están bajo el resguardo del bastidor de acero. En la Figura 18 se muestra un esquema donde pueden verse todos los elementos del sistema *spreader*, estos elementos son:

- Motor
- Cadena mecánica
- Cadena de cable
- Amortiguadores
- Dos barras de tensión
- Sensor de posición, encoder

**Figura 18 Elementos de un spreader telescópico (Konecranes, s.f.)**



Para realizar el cambio de longitud en el caso de los spreader telescópicos, se emplea un motor hidráulico y una cadena conectada a un eje de engranajes. Existe una válvula de contrapeso que bloquea el motor en el momento en el que la válvula de control direccional deja de recibir energía, en ese momento el *spreader* se queda fijo en su posición.

Las vigas telescópicas del *spreader* se desplazan sobre placas móviles que tienen una superficie de baja fricción. Se encuentra una placa por cada esquina inferior del bastidor, una en la parte superior del extremo de la viga y otra en la inferior.

El sistema de amortiguadores está diseñado para absorber la energía de los impactos protegiendo así los elementos estructurales y mecánicos del *spreader*.

La posición de la viga telescópica se codifica mediante un sensor de posición tipo encoder.

Para sensorizar si el *spreader* está correctamente colocado sobre el contenedor se emplean unos palpadores o pasadores de aterrizaje situados en las esquinas. Estos elementos se introducen hacia el interior gracias a un muelle en el momento en el que el *spreader* se apoya sobre el contenedor.

Que el *spreader* este correctamente apoyado sobre el contenedor es una condición fundamental para poder activar el mecanismo de twistlock puesto que, de no ser así, podría producir el cierre del twistlock en el aire o bloquear el contenedor.

Los twistlocks cuentan también con un sistema mecánico para evitar que se desbloqueen en el aire con el contenedor cargado. Además, tienen un margen de flotación de 6mm en todas las direcciones.

Para realizar el bloqueo/desbloqueo se emplean además interruptores o sensores de proximidad, siendo las señales enviadas al PLC.

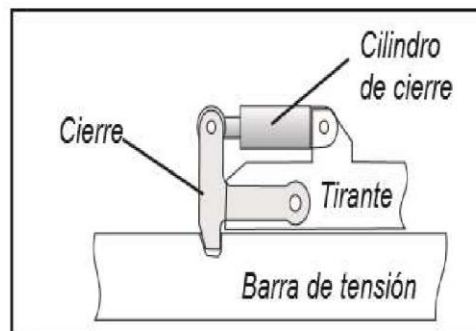
Como se ha comentado al describir la Figura 15, la mayoría de *spreaders* cuentan con *flippers*, facilitando al operario el acoplamiento del contenedor. Estos se sitúan en cada esquina del *spreader* unidos al mismo mediante pernos y tuercas.

En cuanto al funcionamiento mecánico del *spreader* para la elevación doble, se cuenta con cuatro cajas en el bastidor de acero. Cada una cuenta con un dispositivo de bloque, cuando se trabaja con el sistema *twin* estas unidades son desplazadas hacia abajo con cilindros individuales. Gracias a esto se pueden mover dos contenedores de 20 pies, con una separación máxima de 1000 mm, simultáneamente, variando la separación de las cajas del sistema *twin* esta separación puede modificarse en cualquier parte de la operación de la grúa.

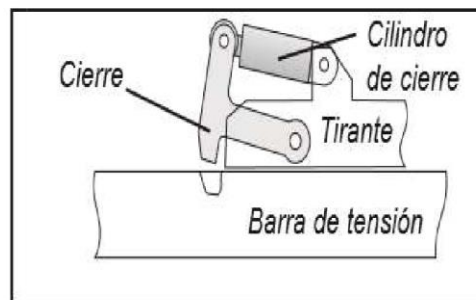
Los cilindros comentados son parte de un conjunto de tirantes, y son cilindros de cierre, también llamados martillos. Estos cilindros se encargan de bloquear el conjunto de tirantes en las barras de tensión, fijando la distancia a 20 pies entre los *twistlocks* y las unidades de *twin* más cercanas.

Se presenta en la Figura 19 un esquema aclarativo sobre el funcionamiento de estos cilindros de cierre y su efecto sobre la barra de tensión que permite fijar la posición telescópica.

Figura 19 cierre de la posición telescópica mediante los cilindros de cierre (Konecranes, s.f.)



Modo telescópico doble



Modo telescópico sencillo

El tirante y la viga telescópica se conectan a la misma barra de tensión, permitiendo mantener la distancia de los 20 pies para los contenedores.

Para la comunicación entre *spreader* y la propia grúa RTG se emplea una manguera de cables, la cual recibe el nombre de umbilical. Normalmente la tensión empleada para la alimentación es de 24 V de continua, los cuales son proporcionados por una fuente de alimentación que se ubica dentro del cuadro eléctrico del propio *spreader*. Existen además medidas de seguridad eléctricas dentro del sistema del *spreader*. Estas son dos: El *spreader* no podrá elevarse en el caso de que todos los *twistlocks* se encuentran bloqueados o desbloqueados y los *twistlocks* solo se podrán bloquear en el caso de que el *spreader* esté correctamente apoyado sobre un contenedor. En el bastidor de acero se disponen unas lámparas indicando la posición de los *twistlocks* y el apoyado correcto del *spreader*.

### 3.3.5 Sistema de abastecimiento

En este apartado se describirá el modo en el que la grúa RTG obtiene la fuerza motriz, desarrollando todos los elementos que conforman el sistema de abastecimiento.

#### 3.3.5.1 Generador Diesel principal

Para generar toda la fuerza motriz necesaria para el movimiento de la grúa se emplea un grupo motor-generator, protegido bajo una carcasa situada en la viga durmiente de uno de los laterales de la grúa RTG. En el caso estudiado el motor es Diesel con 6 cilindros e inyección directa controlada electrónicamente. El motor cuenta con un turbocompresor, un enfriador del aire de admisión, un sistema de refrigeración termostática y un sistema electrónico para la regulación del régimen.

El motor es refrigerado por agua. Acoplado al eje del motor se encuentra un ventilador encargado de impulsar el aire fresco a través del radiador. Acoplado al motor, además, se encuentra una correa,

dispuesta para accionar la bomba de agua. En este circuito se cuenta también con un termostato tipo *spin-on* y con un vaso de expansión.

En cuanto al sistema de combustible, este está formado por una unidad de mando de suministro, una bomba de funcionamiento mediante engranajes destinada a la alimentación del combustible, inyector-bomba accionados electromagnéticamente y filtros. En el sistema de lubricación se puede encontrar un enfriador de aceite refrigerado por agua, una bomba de aceite y filtros.

Para la gestión y coordinación del sistema motor-generator, se tiene una unidad de mando junto con un sistema electrónico de sensores e inyector-bomba que se comunican mediante un bus CAN. Gracias a este sistema se es capaz de gestionar la combustión interna del motor, así como detectar anomalías o fallos en el sistema. Como señales típicas de entrada se pueden resaltar algunas como: Temperatura del refrigerante, presión y temperatura del aire de carga, presión en el cárter del cigüeñal o revoluciones del volante entre otras. Con la información de todas estas señales de entrada se obtienen unas salidas, a través de la unidad de mando, las cuales son: acciones de los inyector-bomba, acción del motor de arranque, accionamiento del relé principal y accionamiento del relé de precalentamiento.

Por último, sobre el generador, cabe mencionar que es de tipo industrial, y su función consiste en transformar la energía mecánica que entrega el motor diésel en energía eléctrica

### 3.3.5.2 Sala de comandos eléctricos

Dentro del sistema de abastecimiento, aparte del generador diésel también se encuentra la sala de comandos eléctricos. La cual está ubicada encima del motor-generator. Para acceder a ella se hace uso de una escalera de mano extensible.

En esta sala se dispone de equipos de conmutación y distribución del suministro eléctrico. Además, en esta sala también se dispone del autómatas programable PLC y el resto de los equipos de control de todos los movimientos de la grúa RTG, así como un ordenador dedicado a la visualización del estado de los parámetros de la grúa para el mantenimiento de esta.

El PLC que se encuentra en la sala de comandos eléctricos es el maestro, sin embargo, repartidos por la grúa se pueden encontrar diferentes nodos esclavos formando una red en estrella. En esta tipología de redes se tiene un nodo maestro al cual se conectan directamente el resto de los nodos. Como inconveniente, el cableado necesario es mayor, pero presenta una mayor fiabilidad puesto que ante el fallo de un nodo esclavo, solo afecta al propio nodo y no al resto de la red (Guijarro Estellés & Ye Lin, 2023). Los componentes con los que cuenta la unidad de autómatas maestra son:

- Procesador
- Fuente de alimentación
- Módulos de entrada salida, los necesarios según el caso
- Módulo de memoria
- Unidad de programa

En la Figura 20 se puede ver el PLC maestro de una grúa RTG, en este caso se trata de un modelo SIMATIC de Siemens. Según el modelo y marca concreto de los autómatas de la grúa, la comunicación se realizará con un protocolo determinado. En este caso, al tratarse de un PLC de Siemens, la comunicación entre sensores y PLCs es Profibus.

La comunicación entre los nodos esclavos y el PLC maestro se lleva a cabo mediante fibra óptica gracias al uso de convertidores fibra-profibus.

**Figura 20** autómatas maestro de una grúa RTG (Villodres Martín, 2017)



Para la monitorización global de la grúa se hace uso de un sistema CMS (*Content Management System*), software informático que permite modificar, recuperar o almacenar contenido relativo a la grúa y sus sistemas.

### 3.3.6 Otros sistemas

Se presentan ahora dos sistemas auxiliares que presentan las grúas RTG. Estos sistemas no serán objeto de estudio ni sugeridos como propuestas de mejora ni automatización, puesto que se tratan de sistemas de uso común en la mayoría de las grúas RTG y se dará por hecho su aprovechamiento.

#### 3.3.6.1 Sistema de anticolisión del pórtico

Este sistema vela por la seguridad del personal que trabaja en las cercanías de la grúa. También se encarga de evitar colisiones con otro tipo de obstáculos y máquinas.

Para el funcionamiento de este sistema se instalan cuatro sensores en los laterales inferiores del pórtico, uno por cada esquina. En el momento en que estos sensores se activan, envían una señal al PLC correspondiente deteniendo inmediatamente el movimiento de la grúa.

Los sensores utilizados para detectar objetos han sido tradicionalmente ultrasónicos, sin embargo, las últimas tendencias son el uso de sensores de eco pulsos, los cuales presentan menos problemas cuando la meteorología es adversa, al no dar falsos positivos con las gotas de lluvia, como si puede llegar a ocurrir con los sensores ultrasónicos.

#### 3.3.6.2 Sistema de auto-steering

El sistema *auto-steering*, cuya traducción literal sería dirección automática, sirve para facilitar el desplazamiento del pórtico al operario, al realizarlo de una forma semiautomática. Con este sistema,

el operario es capaz de controlar el movimiento de la grúa a lo largo de un bloque de contenedores con el simple movimiento del *joystick* sin realizar correcciones. Este sistema hace uso del GPS. Además de facilitar la tarea del operario y mejorar la precisión de los movimientos en cualquier tipo de superficie, también es un sistema de seguridad, evitando posibles colisiones.

Para el funcionamiento de este sistema son necesarios diversos elementos: Una antena GPS en la estación base, antenas GPS en la grúa RTG y un software adecuadamente actualizado para dar soporte al sistema *auto-steering*.

### 3.4 DATOS TÉCNICOS DE UNA GRÚA RTG TIPO

En este apartado se presentan diversas tablas con los datos relativos a los valores que toman los diversos parámetros de una grúa RTG tipo de la marca Konecranes. Estos datos servirán para la creación precisa del modelo en los posteriores apartados. Todos los datos presentados a continuación se encuentran disponibles a través del trabajo anteriormente mencionado, (Villodres Martín, 2017). Además, para contrastar los datos de este trabajo y ampliarlos también se acude a un documento web de Konecranes que describe las especificaciones técnicas típicas de sus grúas RTG (Konecranes, 2021).

La grúa tipo seleccionada cuenta con 8 ruedas, tendrá una anchura de 6 contenedores más la línea para camiones y una altura máxima de 6 contenedores (1 sobre 5). Primero se presentan los datos generales de la maquina a modelar:

**Tabla 1 Datos generales de la grúa tipo**

Datos generales	
<b>Máquina</b>	Grúa pórtico de patio
<b>Tipo</b>	RTG, grúa pórtico sobre ruedas
<b>Abastecimiento</b>	Grupo diésel DE 610 kVA
<b>Marca</b>	Konecranes
<b>Movimientos de translación del pórtico</b>	8 motores AC de 20 kW
<b>Movimientos de elevación</b>	2 motores AC de 110 kW
<b>Movimientos de translación del carro</b>	4 motores AC de 9 kW
<b>Maquina auxiliar de elevación</b>	4 motores AC de 5 kW

Tras este resumen de los datos generales, se consideran ahora los valores de sus características principales, dimensiones, capacidades, rendimientos y velocidades:

**Tabla 2 Características principales de la grúa tipo**

Características principales	
<b>Ancho</b>	6 + 1 línea de camiones
<b>Luz</b>	23,6 m
<b>Altura</b>	1 sobre 5
<b>Altura de elevación</b>	18,10 m
<b>Capacidad de elevación</b>	40 LT (long tons)
<b>Rendimiento</b>	40 contenedores/hora
<b>Movimientos simultáneos</b>	2

**Tabla 3 Velocidades de los movimientos de la grúa tipo**

Velocidades	
Velocidad de elevación con carga completa	26 m/min
Velocidad de elevación sin carga	52 m/min
Velocidad del carro con/sin carga	70 m/min
Velocidad de desplazamiento del pórtico	130 m/min

En las siguientes tablas se muestran las características concretas de los motores de elevación, frenos y otros elementos de la grúa:

**Tabla 4 Características del motor de elevación de la grúa tipo**

Motor de elevación	
Tipo	Jaula de ardilla de frecuencia controlada
Voltaje	500 V
Frecuencia	60 Hz
Potencia	110 kV ED 40%
Intensidad nominal	165 A
Velocidad de sincronismo	1800 rpm
Velocidad nominal	1771 rpm
Torque máximo	2500 Nm
Peso	349 kg

**Tabla 5 Características de la reductora de elevación de la grúa tipo**

Reductora de elevación	
Tipo	Reductora helicoidal
Unidades reductoras	2
Radio de transmisión	1:48055
Peso	1000 kg

**Tabla 6 Características del freno de elevación de la grúa tipo**

Freno de elevación	
Tipo	Freno electromagnético de disco
Par	2100 Nm
Revestimiento/Discos de fricción	2/1
Peso	242 kg

**Tabla 7 Características de los bogies de la grúa tipo**

Bogies	
Tamaño del neumático/presión bar	18,00 x 25 / 10
Carga por rueda	31,5 ton
Ruedas accionadas	50% (4 ruedas)
Ancho de pista	1,8 m (mínimo)

Se muestran a continuación las propiedades del motor diésel que proporciona la fuerza motriz para el movimiento de la grúa.



**Tabla 8 Características del motor diésel de la grúa tipo**

Motor diésel	
Potencia aparente nominal	620 kVA
Potencia activa nominal	488 kW
Frecuencia	50 Hz
Fases	3
Rpm	1500
Tensión nominal	500 V
Intensidad nominal	704,4 A
Factor de potencia	0,8
Excitación	34 V – 2A

Por último, es relevante conocer la información de la masa de cada parte de la grúa, esta información proporcionada por Konecranes (Konecranes, 2022), se presenta en la Tabla 9.

**Tabla 9 Masa de las grúas RTG y sus elementos**

Tamaño de la RTG	Estructura metálica	Pasarelas	Pasos de cables	Masa total (kg)
1 sobre 5, 5+carril	58000	6800	1240	64800
1 sobre 5, 6+carril	61500	7,000	1400	68500
1 sobre 5, 7+carril	64000	7200	1560	71200
1 sobre 6, 5+carril	66500	6800	1240	73300
1 sobre 6, 6+carril	70000	7000	1400	78400
1 sobre 6, 7+carril	73500	7200	1560	82260
Bogies de 16 ruedas				22000
Bogies de 8 ruedas				25000
Control activo de la carga de los carros				22500
Carro (Dynapilot)				20500
Spreader				8000
Deslizadera				2000
Generador diésel				6000
Sala eléctrica				5000

Aparte de estas tablas con información sobre las características relativas a la grúa, se presenta también una pequeña tabla resumen de las características de dimensiones y masa de los contenedores marítimos de 20 pies, a partir de los datos en (CargoFlores, s.f.).

**Tabla 10 Características de los contenedores marítimos**

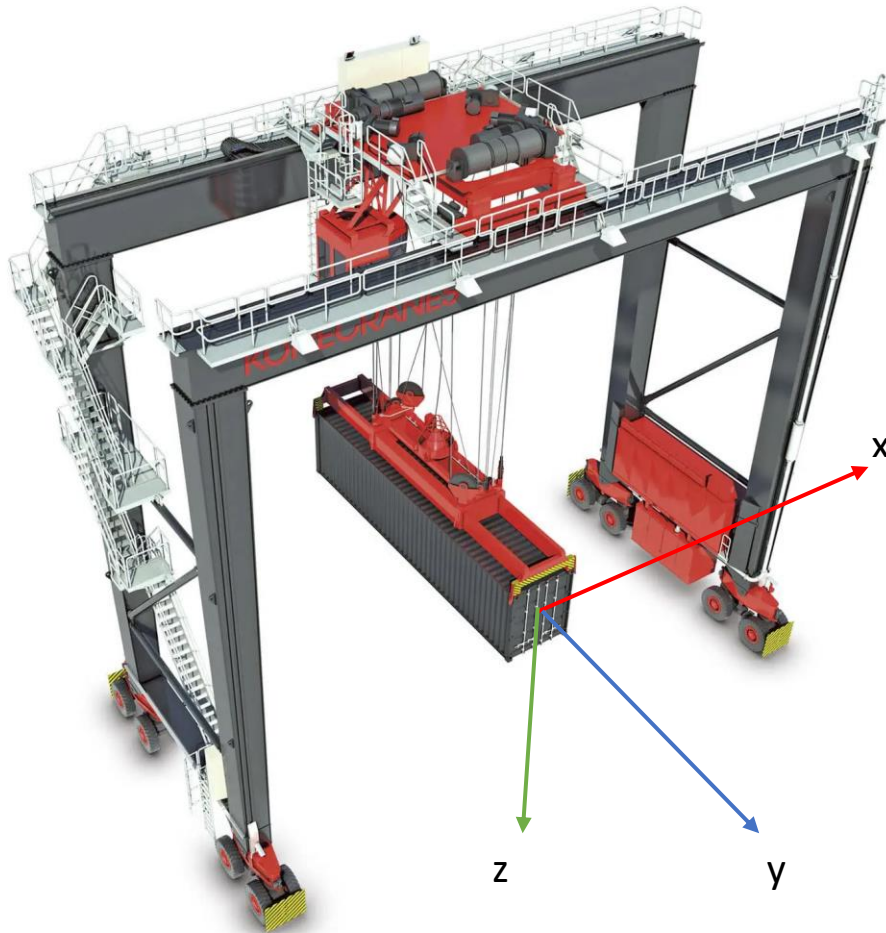
Contenedor marítimo de 20 pies	
Alto	2621,28 mm
Ancho	2438,4 mm
Largo	6096 mm
Masa en vacío	2250 kg
Masa máxima	28240 kg

Contando con todos estos datos, se puede comenzar ya con la creación del modelo de la grúa RTG simulada

### 3.5 MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO DE LA GRÚA

Antes de comenzar con el modelo físico-matemático de la grúa, se debe definir alguna nomenclatura que se empleará de esta parte del trabajo en adelante. Primero se definen los ejes de desplazamiento de la carga suspendida de la grúa RTG de la forma mostrada en la Figura 21.

**Figura 21 Ejes de desplazamiento de la carga de la grúa RTG modificado de (Konecranes, s.f.)**

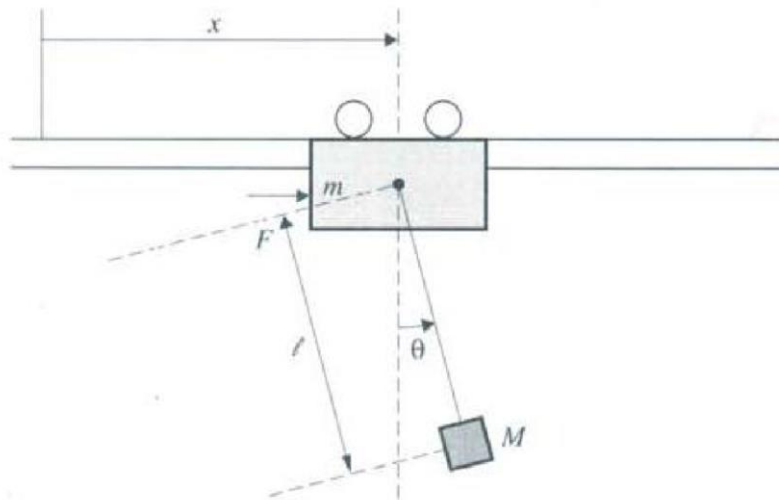


La carga que transporte la grúa podrá moverse de forma independiente en cualquiera de estos tres ejes. El movimiento de la carga en el eje x es proporcionado por el desplazamiento del carro sobre el pórtico, el desplazamiento en el eje y se produce gracias a la acción de las ruedas de los bogies, que proporcionan la fuerza necesaria para el desplazamiento longitudinal, y, por último, el movimiento en el eje z es proporcionado por la acción del motor de elevación.

En este apartado se pretende entender las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de, sobre todo, los movimientos horizontales de la carga cuando se aplica cierta fuerza sobre el carro o sobre el pórtico. El movimiento de elevación se excluye de este estudio previo puesto que su funcionamiento se considera trivial.

Para modelar los dos movimientos horizontales de la grúa, se tratará cada uno de ellos como la salida de un sistema de carro con péndulo. El sistema de carro con péndulo es un sistema ampliamente estudiado puesto que es la base de multitud de sistemas y máquinas industriales, como es el caso presente. El esquema fundamental de un sistema de carro con péndulo es el mostrado en la Figura 22

Figura 22 Esquema del sistema carro con péndulo



Para este estudio preliminar de las ecuaciones matemáticas que rigen los movimientos se considerará por separado el movimiento en cada eje, obteniendo un único modelo de carro con péndulo con variaciones en sus parámetros para cada desplazamiento. Se supondrá que no hay interacción entre los modelos de cada movimiento en el caso de desplazamientos simultáneos en ambos ejes. Esta simplificación se lleva a cabo debido a que este apartado tiene el objetivo de comprender la naturaleza física detrás de las operaciones de la grúa, sin embargo, no se pretende obtener un modelo realista final, el cual se implementará más adelante en Simscape Multibody.

Las variables fundamentales del sistema de carro con péndulo aplicadas al caso de la grúa son:

- $m$ : masa del carro o pórtico
- $M$ : masa de la carga
- $x$ : desplazamiento horizontal del carro o del pórtico
- $F$ : fuerza aplicada al carro o al pórtico
- $l$ : longitud del cable
- $\theta$ : ángulo de la carga con la vertical en el plano X-Z o Z-Y

En este sistema, las entradas serán las fuerzas  $F$  y las salidas el desplazamiento  $x$  y el ángulo  $\theta$ . Para la obtención de las ecuaciones que rigen el sistema se seguirá el planteamiento seguido por el estudio de modelado y control de un sistema de carro con péndulo (Omidi), la aplicación de la mecánica de Lagrange. La forma de aplicar el método de Lagrange se puede consultar en diversas fuentes (Morin, 2007), (UPV/EHU). Con la aplicación de este método se obtendrán dos ecuaciones diferenciales que corresponderán a las dos coordenadas generalizadas del sistema de carro con péndulo,  $x$  y  $\theta$ .

Para aplicar el método de Lagrange el primer paso es calcular la energía cinética del sistema, la cual se define como

$$T = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Donde  $m$  es la masa y  $v$  la velocidad del cuerpo. En nuestro sistema existen dos masas, el carro y el péndulo, despreciando la masa del cable que une el péndulo con el carro. Si se calcula la energía cinética del carro, esta es solo traslacional y se corresponde con la expresión

$$T_1 = \frac{1}{2} m \cdot \dot{x}^2$$

La energía cinética del péndulo tiene también una componente rotacional, sin embargo, por ser esta energía despreciable comparativamente con la energía traslacional no se tendrá en cuenta, teniendo como expresión de la energía cinética del péndulo:

$$T_2 = \frac{1}{2} M \cdot \left( \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 \right)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} M \cdot \left( \dot{x}^2 + \dot{\theta}^2 \cdot l^2 + 2 \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot l \cdot \cos(\theta) \right)$$

Con las dos expresiones anteriores, la energía cinética total es:

$$T = \frac{1}{2} m \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} M \cdot \left( \dot{x}^2 + \dot{\theta}^2 \cdot l^2 + 2 \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot l \cdot \cos(\theta) \right)$$

Por otra parte, se calcula la energía potencial del sistema. Esta energía se debe exclusivamente al péndulo, y su expresión es:

$$V = M \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos(\theta))$$

Calculadas ya la energía potencial y cinética del sistema se calcula ahora el lagrangiano, el cual es la resta de la cinética menos la potencial

$$\mathcal{L} = T - V$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} m_c \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} M \cdot \left( \dot{x}^2 + \dot{\theta}^2 \cdot l^2 + 2 \cdot \dot{x} \cdot \dot{\theta} \cdot l \cdot \cos(\theta) \right) - M \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos(\theta))$$

Se deben calcular ahora las ecuaciones de Euler-Lagrange, las cuales vienen dadas por la expresión:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = Q_i$$

Donde  $q_i$  representa los grados de libertad (coordenadas generalizadas) y  $Q_i$  representa las fuerzas generalizadas. En este sistema se tienen dos grados de libertad: el desplazamiento del carro  $x$  y el ángulo  $\theta$ . En cuanto a fuerzas generalizadas solo se tiene una, la fuerza aplicada al carro o al pórtico  $F$

Tras el cálculo de las ecuaciones de Euler-Lagrange se obtienen las siguientes expresiones:

$$(M + m)\ddot{x} + (M \cdot l \cdot \cos(\theta))\ddot{\theta} - M \cdot l \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \text{sen}(\theta) = F$$

$$(\cos(\theta))\ddot{x} + (l) \cdot \ddot{\theta} + g \cdot \text{sen}(\theta) = 0$$

Si se opera sobre estas ecuaciones se pueden conseguir dos expresiones en las que aparecen despejadas las segundas derivadas de las coordenadas generalizadas, de forma que se facilita su manipulación posterior, por ejemplo, para implementarlas en una simulación, o para obtener un modelo en espacio de estados

$$\ddot{x} = \frac{F + M \cdot l \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \text{sen}(\theta) + M \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \cos(\theta)}{M + m_c - M \cdot \cos^2(\theta)}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(F + M \cdot l \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \text{sen}(\theta)) \cos(\theta) - (m_c + M)g \cdot \text{sen}(\theta)}{l(M + m_c - M \cdot \cos^2(\theta))}$$

Con estas expresiones, se puede establecer un sistema en espacio de estados considerando los estados siguientes:

$$x_1 = x$$

$$x_2 = \theta$$

$$x_3 = \dot{x}$$

$$x_4 = \dot{\theta}$$

Con estas definiciones, el sistema completo del movimiento de la carga de la grúa en el plano de movimiento del carro queda definido por las siguientes ecuaciones de estado:

$$\dot{x}_1 = x_3$$

$$\dot{x}_2 = x_4$$

$$\dot{x}_3 = \frac{F + M \cdot l \cdot x_4^2 \cdot \sin(x_2) + M \cdot g \cdot \sin(x_2) \cdot \cos(x_2)}{M + m - M \cdot \cos^2(x_2)}$$

$$\dot{x}_4 = \frac{(F + M \cdot l \cdot x_4^2 \cdot \sin(x_2)) \cos(x_2) - (m + M)g \cdot \sin(x_2)}{l(M + m - M \cdot \cos^2(x_2))}$$

Como consideración sobre este modelo matemático del sistema de movimiento de la grúa RTG en cada uno de sus desplazamientos horizontales se debe tener en cuenta que no se tiene en consideración la fuerza de rozamiento, por tanto, ante la aplicación de una fuerza F no habrá nada que detenga el movimiento. Además, la posición x que se obtiene como salida del modelo no es la posición de la carga si no la del carro en el movimiento transversal o la del pórtico en el movimiento longitudinal.

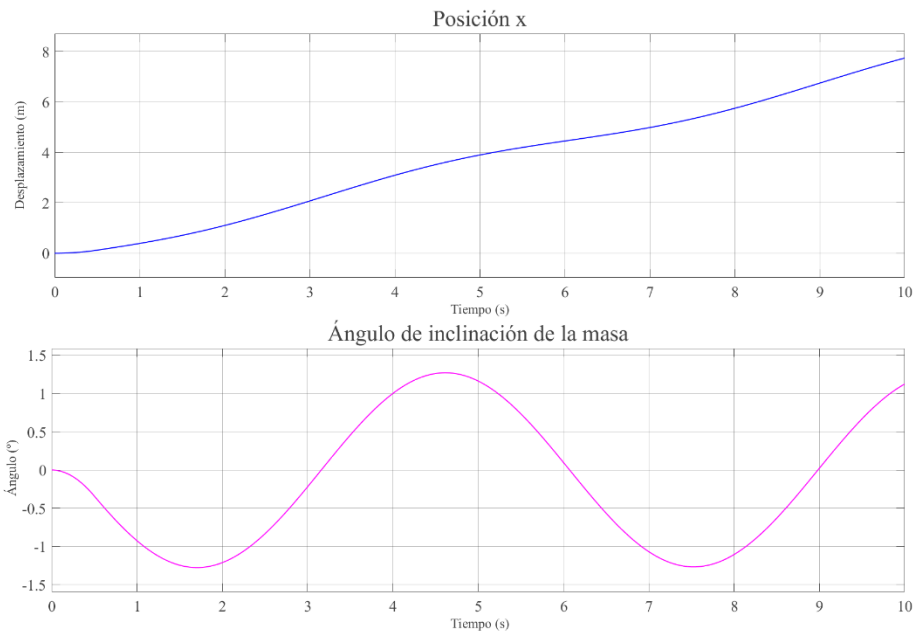
Con todas estas limitaciones en mente se plantea la implementación de este modelo en espacio de estados dentro del software Simulink mediante un bloque *S-function*, el cual permite el cálculo de sistemas dinámicos.

Tras la implementación de este sencillo modelo en Simulink se simula para los dos casos de movimiento. Para ello se sustituirán los valores de masas por unos adecuados, los valores numéricos empleados son:

- Masa del carro = 20500 kg
- Masa del pórtico = 64800 kg
- Masa de la carga (contenedor lleno) = 28240 kg
- Longitud del cable (Longitud máxima) = 20 m

Se presenta primero, en la Figura 23, la simulación de la respuesta de la posición del carro y el ángulo de inclinación de la masa colgada ante un impulso de fuerza de 20 kN aplicada durante medio segundo.

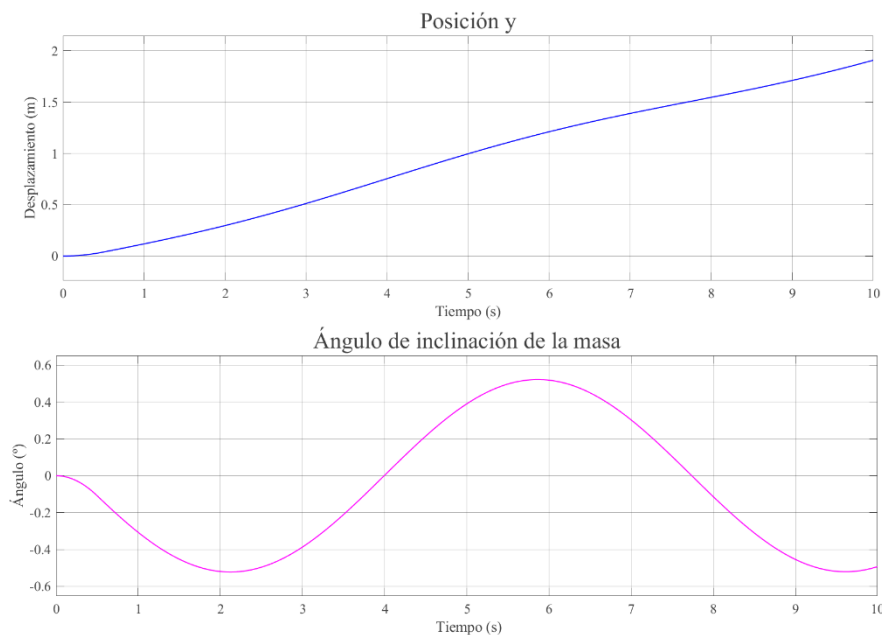
**Figura 23 Simulación del movimiento del carro ante el modelo matemático inicial**



Se observa como ante este impulso la posición  $x$  aumenta de forma constante, pero con una cierta oscilación debida a las variaciones en la posición de la masa colgada, la cual oscila con el ángulo mostrado, tirando del carro tanto cuando está delante de él, aumentando su velocidad de desplazamiento, como cuando se sitúa detrás, ralentizando la velocidad del carro.

La misma simulación se realiza ahora para las condiciones de movimiento de la carga en el eje longitudinal, sustituyendo la masa del carro por la del pórtico, el cual ahora, es el que se mueve. La Figura 24 muestra el resultado en este caso. Se observa claramente que, ante el mismo impulso, dado que la masa del pórtico es mucho mayor que la del carro, el desplazamiento total se reduce notablemente. Además, la oscilación de la carga presenta también una oscilación mucho menor, haciendo que la velocidad de desplazamiento del pórtico sea menos variable en el tiempo.

**Figura 24 Simulación del movimiento del pórtico ante el modelo matemático inicial**



Tras el análisis de estos resultados se comprueba que el modelo físico-matemático planteado para los movimientos horizontales de la grúa RTG es válido y representa de forma adecuada el comportamiento aproximado de una grúa ideal. Sin embargo, como se ha adelantado anteriormente, este modelo tiene fuertes limitaciones, siendo las más clara, la falta de fuerzas de rozamiento o la imposibilidad de conocer la posición de la masa colgada. Por estos motivos, se concluye que, este modelo ha cumplido su propósito, el cual era entender el funcionamiento aproximado de un sistema de grúa RTG, y servirá de punto de partida para comparar y comprobar la validez del modelo simulado final.

## 3.6 MODELO EN SIMULINK DE LA GRÚA RTG

Se muestran en este apartado todas las tareas realizadas para la consecución de un modelo realista de la grúa RTG tipo, simulada mediante el software Matlab Simulink con la herramienta Simscape multibody. Este modelo de simulación se podría haber realizado de diferentes formas. Por ejemplo, podría haberse empleado el software Ansys Motion, el software Adams, o la herramienta Dymola, de CATIA. La elección de la herramienta multibody de Simscape se fundamenta en que, a diferencia del resto, es un software con una interfaz muy sencilla, que, además, facilita el entendimiento de la estructura del modelo, sus elementos y las relaciones entre ellos. Esto es lo que se busca precisamente en este trabajo, la creación de un modelo intuitivo de forma que se entienda y se pueda observar fácilmente su funcionamiento. Además, Su integración con Simulink permite la fácil incorporación de controladores y otros componentes de sistemas, lo cual facilitará las tareas de los siguientes apartados. En relación con los softwares mencionados, Simscape multibody presenta ciertas deficiencias, como, por ejemplo, la complejidad a la hora de realizar análisis dinámicos de fuerzas, deformaciones o tensiones. Sin embargo, en este caso, no se pretende realizar un análisis del comportamiento de los materiales de la grúa ante determinadas fuerzas, ni se busca un estudio de deformaciones y tensiones. Por lo tanto, teniendo en consideración los objetivos perseguidos, Simscape multibody es la mejor opción para la creación del modelo simulado de la grúa.

### 3.6.1 Creación de modelos 3D

La primera tarea fundamental para la creación del modelo simulado es la generación de todos los modelos CAD de los distintos elementos de la grúa RTG. Los elementos creados no pretenden ser exactos ni fieles en todas sus particularidades geométricas, sin embargo, si serán modelos que representen de forma precisa las dimensiones relevantes a efectos del comportamiento realista del modelo simulado de la grúa, y, muestren de forma general su forma y estructura. Estos modelos se generan mediante el software Autodesk Inventor tomando como referencia datos y esquemas proporcionados por diferentes documentos de referencia (Liebherr) (Konecranes, 2022) (Konecranes, 2021) (CargoFlores, s.f.).

Se muestran a continuación los diferentes elementos CAD generados, indicando su función dentro del modelo simulado y su relación con el resto de las partes. Estos elementos son: Pórtico, ruedas, carro y spreader. Además de los elementos de la grúa RTG también se diseña un contenedor marítimo de 20 pies, puesto que será imprescindible a la hora de simular su transporte mediante la grúa.

### 3.6.1.1 Pórtico

Este es el elemento central de la grúa RTG, elemento al cual van unidos el resto. Su función es primordial, y por ese motivo es crítico un diseño realista de este elemento, con unas medidas fieles a la realidad. Sus medidas más importantes son la luz, la distancia entre las vigas superiores y la altura. Los elementos que estarán conectados directamente con el pórtico serán las ruedas y el carro. Se muestra el diseño 3D de este elemento en la Figura 25.

**Figura 25 Modelo CAD del pórtico**

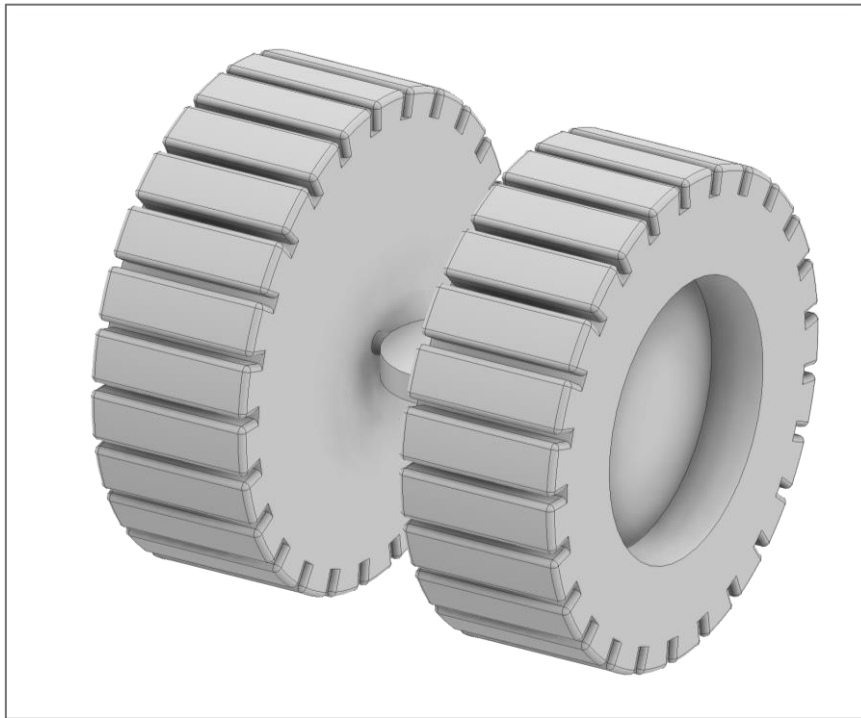


### 3.6.1.2 Ruedas

Este elemento se diseña separado del pórtico debido a que el modelo simulado debe permitir el giro de las ruedas, de forma que pueda representarse el movimiento transversal de la grúa. Este elemento solo tiene unión con el pórtico. Su dimensión más relevante es el diámetro de la propia rueda, no siendo necesario para el modelo la representación de todos los detalles complejos del sistema de bogies. El diseño de las ruedas se observa en la Figura 26.



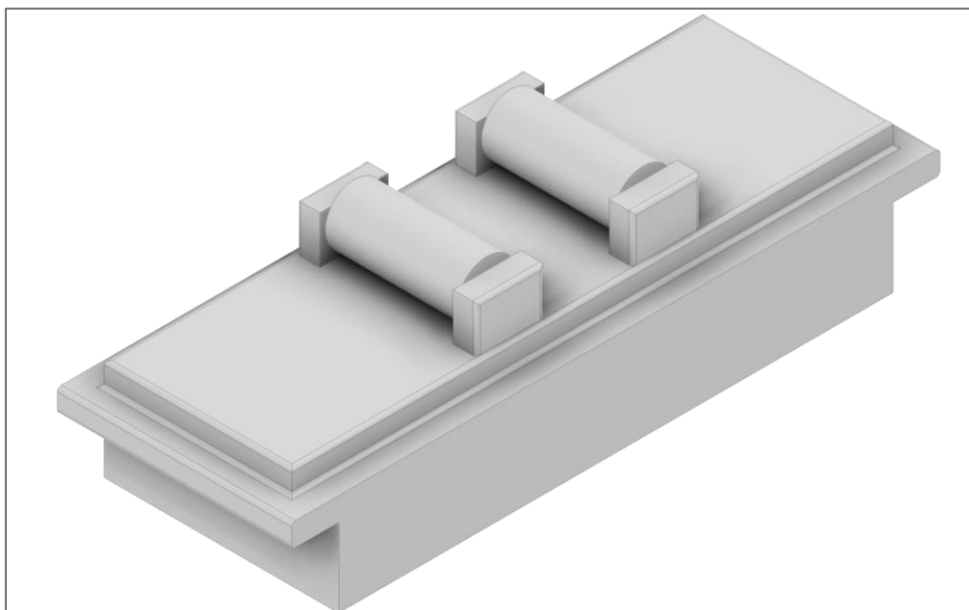
**Figura 26 Modelo CAD de las ruedas**



### *3.6.1.3 Carro*

El carro es otro de los elementos fundamentales en el modelo simulado de la grúa. Este elemento estará en contacto directo con las vigas superiores del pórtico permitiéndose su desplazamiento sobre estas y, de él, saldrán los cuatro cables que se conectarán al spreader. Cabe mencionar que los cables no se modelan en 3D puesto que su forma es trivial, y, además, deberán ser de geometría variable. Las cotas geométricas más relevantes en este modelo son su longitud, la cual debe coincidir con la separación de las vigas del pórtico, y la distancia entre la salida de los cuatro cables. El diseño de este elemento se muestra en la Figura 27.

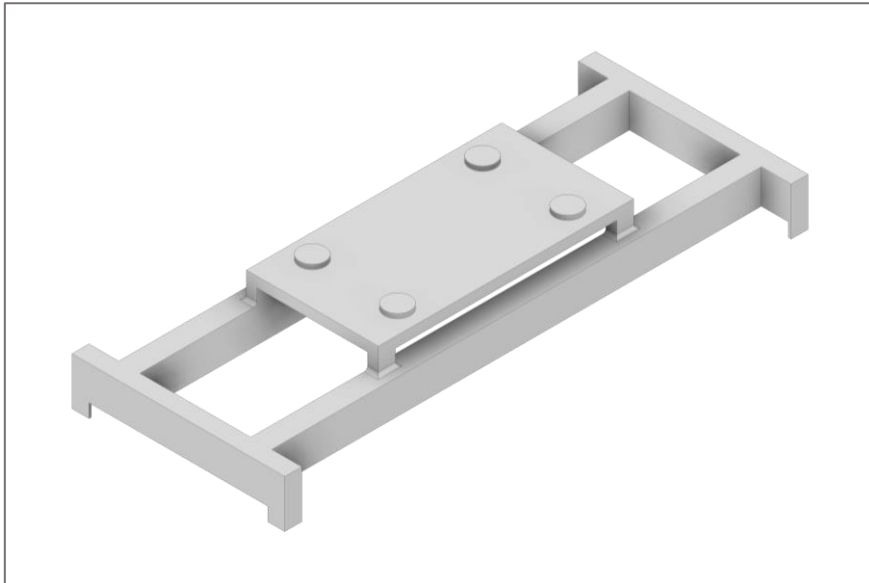
**Figura 27 Modelo CAD del carro**



### 3.6.1.4 Spreader

El spreader es la última parte de la grúa que se modela en 3D para emplear en el modelo simulado. Este elemento está conectado por su parte superior con los cuatro cables que salen del carro, y por su parte inferior se enganchará y desenganchará con los contenedores que deban ser trasladados. Su diseño se muestra en la Figura 28. Las dimensiones más relevantes de este elemento son las distancias de los enganches inferiores, las cuales deben ser coincidentes con las dimensiones del contenedor y las distancias entre los cables.

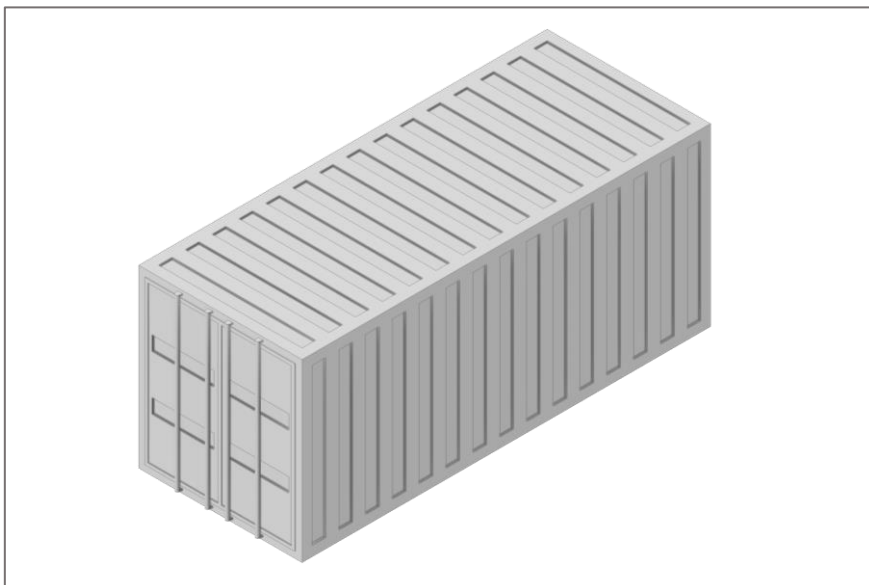
**Figura 28 Modelo CAD del spreader**



### 3.6.1.5 Contenedor

Aparte de los elementos de la grúa, también se crea el modelo CAD de un contenedor marítimo de 20 pies, que será transportado mediante la grúa RTG. En este caso todas sus dimensiones son relevantes. El diseño 3D del contenedor se muestra en la Figura 29.

**Figura 29 Modelo CAD del contenedor de 20 pies**



### 3.6.2 Creación del modelo simulado en Simscape multibody

Se dedica este apartado a explicar la forma y estructura del modelo de la grúa simulada en Simscape multibody. Se ha de tener en consideración que no se mostrarán todos los detalles de cada uno de los bloques empleados, estos detalles se muestran en el documento anexo.

El modelo simulado de la grúa se ha diseñado de forma modular y por capas, siendo las capas más externas las más entendibles y cercanas al usuario, y las más internas las más complejas y cercanas al programador. Este esquema cuenta con 3 capas principales, las cuales se muestran a continuación.

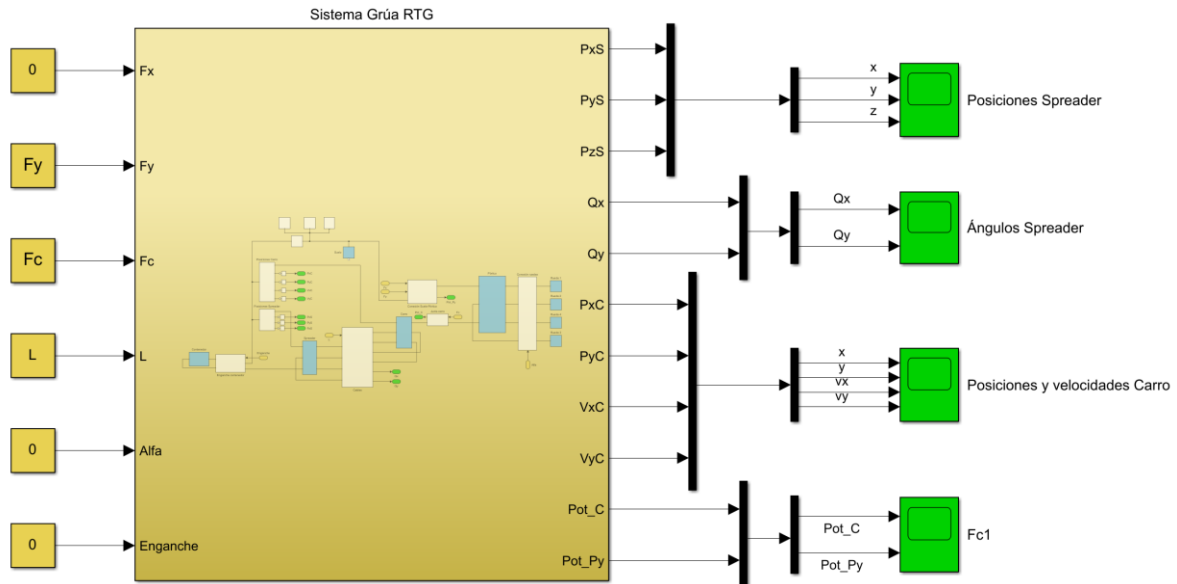
La primera capa, la más externa, cuenta con un único subsistema, el cual consiste en la totalidad del modelo de la grúa simulada. Este subsistema cuenta con cinco entradas y once salidas. Estas entradas y salidas son:

- Entradas:
  - Fx: Fuerza aplicada en las ruedas en el movimiento transversal del pórtico
  - Fy: Fuerza aplicada en las ruedas en el movimiento longitudinal del pórtico
  - Fc: Fuerza aplicada al carro
  - L: Longitud de los cables
  - Alfa: Ángulo de las ruedas
  - Enganche: Señal de enganche y desenganche del spreader al contenedor
- Salidas:
  - PxS: Posición transversal del spreader
  - PyS: Posición longitudinal del spreader
  - PzS: Posición vertical del spreader
  - Qx: Ángulo de oscilación del contenedor en el plano Y-Z
  - Qy: Ángulo de oscilación del contenedor en el plano X-Z
  - PxC: Posición transversal del carro
  - PyC: Posición longitudinal del carro
  - VxC: Velocidad transversal del carro
  - VyC: Velocidad longitudinal del carro
  - Pot\_C: Potencia consumida en el movimiento del carro
  - Pot\_Py: Potencia consumida en el movimiento del pórtico

Antes de continuar con el análisis del modelo desarrollado se han de comentar algunas consideraciones sobre las entradas y salidas empleadas. La primera de estas consideraciones es que, las entradas relativas a la longitud de los cables y el ángulo de las ruedas afectan directamente al valor de estas variables, es decir, no se simula la dinámica entre una fuerza aplicada y la respuesta del movimiento resultante de dicha fuerza, como sí ocurre con el resto de las entradas. La justificación de esta decisión se encuentra en el hecho de que el control de estos parámetros es trivial, pudiendo conseguirse fácilmente en bucle abierto con el uso de sensores tipo encoder. Puesto que el objetivo de este modelo es generar más adelante una propuesta de control, añadir la dinámica de estas variables solo conseguiría dificultar la ejecución de la simulación. Sin embargo, aunque no se haya simulado directamente la dinámica de estas variables se comentará más adelante como podría conseguirse un modelo con una simulación completa de la dinámica de estos sistemas. Como segundo comentario, con respecto a las salidas, debe tenerse en cuenta que estas se obtienen de forma ideal desde las fuentes de movimiento. Sin embargo, en la realidad, estas medidas se obtendrán con

determinados sensores sobre el spreader o el carro, como pueden ser acelerómetros, giroscopios, encoders, etc. Los cuales, teniendo en cuenta ciertos parámetros de la grúa puedan obtener las posiciones y oscilaciones de los distintos elementos. Por último, las salidas  $P_xS$ ,  $P_yS$ ,  $P_zS$ ,  $Q_x$  y  $Q_y$  se miden sobre el spreader, pero, a efectos prácticos, cuando este spreader tiene un contenedor enganchado, estas medidas serán las relativas a la posición y oscilación de este contenedor. En la Figura 30 se muestra el esquema de la capa más externa del modelo en Simulink.

**Figura 30 Esquema externo en Simulink del modelo de la grúa RTG**



Aunque en este esquema se muestran ciertos bloques amarillos que representan las entradas y ciertos bloques verdes que permiten la visualización de las salidas, se trata simplemente de una propuesta de disposición de entradas y salidas, siendo lo relevante de este esquema la forma en que se engloba el sistema completo de la grúa en un solo subsistema desde el cual se puede actuar directamente sobre las entradas y obtener información directa de las salidas.

Se presenta ahora el interior de este subsistema, la segunda capa del esquema de la grúa. En esta capa se presentan los elementos principales de la grúa y las conexiones entre ellos, no obstante, la naturaleza de las conexiones y articulaciones entre estos sólidos se encuentran en una capa inferior. Esta capa cuenta con diferentes tipos de bloques principales, los cuales siguen un cierto código de colores para simplificar su comprensión, estos son: Los sólidos modelados en 3D, representados en azul; los subsistemas donde encontramos las articulaciones y dinámicas entre estos sólidos, representados en gris; y, por último, en blanco se representan aquellos bloques fundamentales del software multibody de Simscape, necesarios para tareas como establecer una referencia, medir posiciones, velocidades y ángulos o establecer transformaciones geométricas entre los sólidos. El esquema general del subsistema de la grúa simulada se representa en la Figura 31. En este esquema se pueden ver todas las conexiones entre los sólidos mediante diferentes subsistemas, los cuales forman la tercera capa del modelo simulado y son: "Conexión Suelo-Pórtico", "Conexión ruedas", "Junta carro", "Cables" y "enganche contenedor". Además, en la parte superior de este subsistema se encuentran los bloques encargados de establecer una referencia y una configuración determinada para el modelo, y, los bloques Posiciones Carro y Posiciones Spreaders que representan sensores.

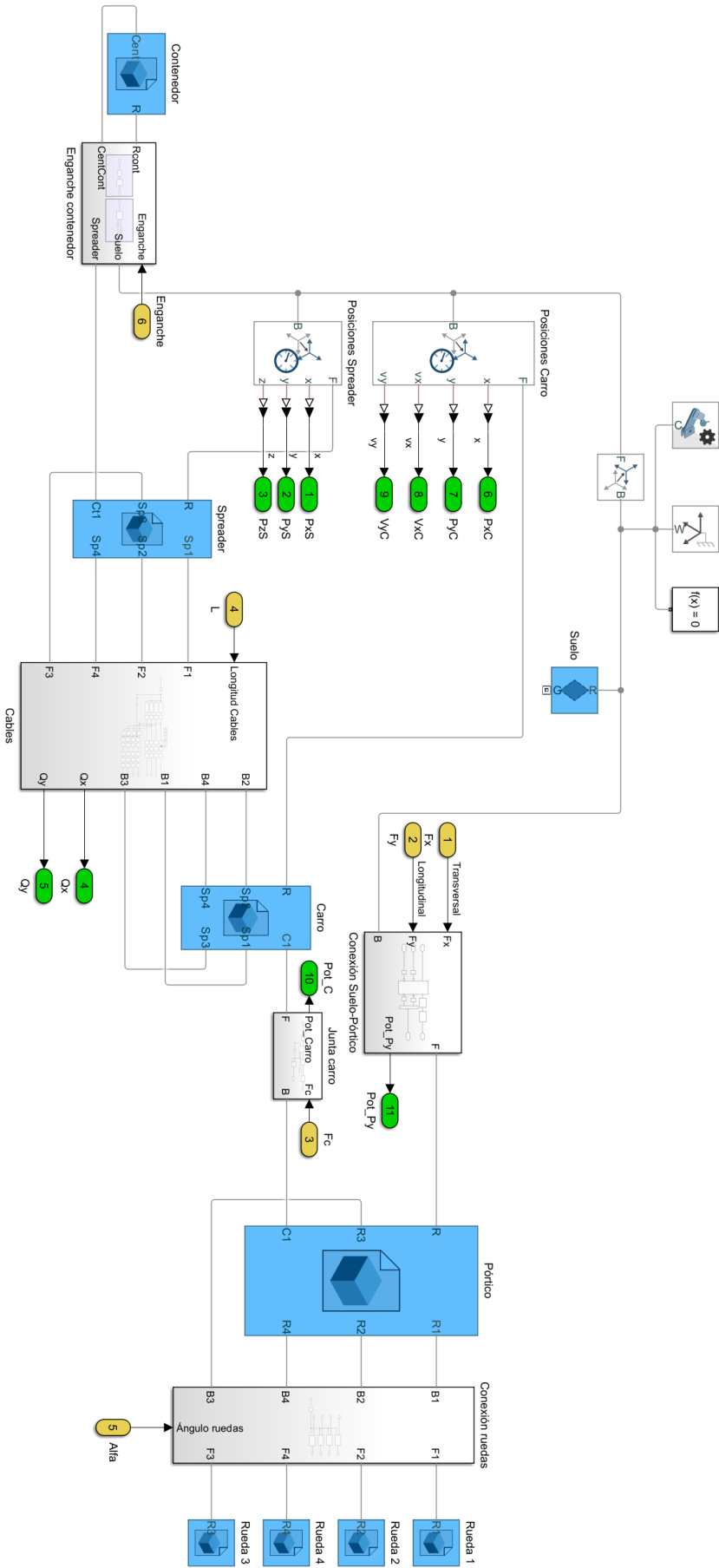
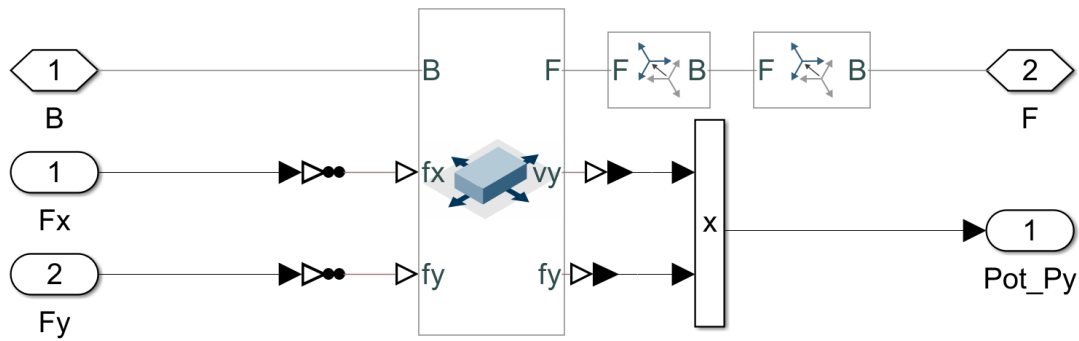


Figura 31 Esquema del subsistema de la grúa RTG en Simulink

Se presentan a continuación los diferentes subsistemas, enunciando sus características principales. El primer subsistema a tratar es el denominado “Conexión Suelo-Pórtico”. El interior de este subsistema se presenta en la Figura 32.

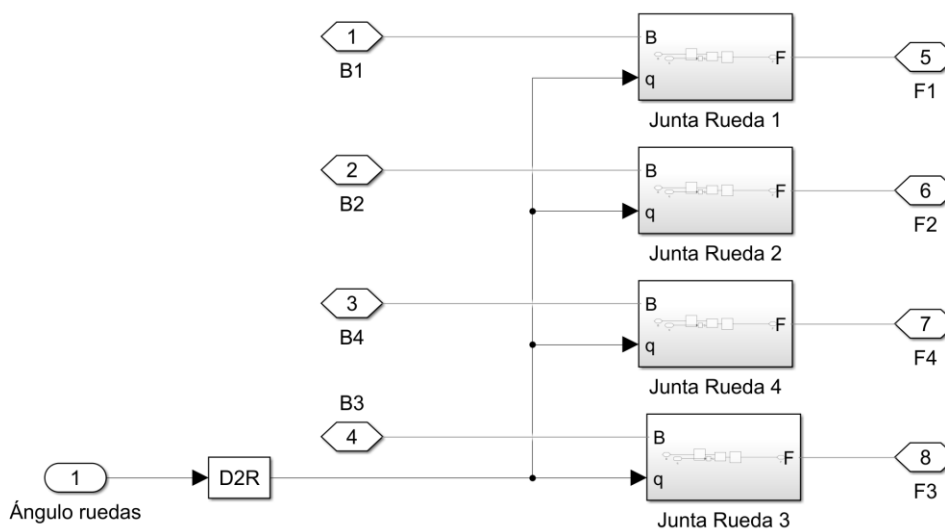
**Figura 32 Subsistema Conexión Suelo-Pórtico**



Este subsistema es muy sencillo, solo cuenta con una entrada y una salida geométrica, B y F, los cuales para todo el modelo significan *Base* y *Follower* respectivamente. Además, cuenta con dos entradas numéricas,  $F_x$  y  $F_y$ , mediante las cuales se aplica la fuerza longitudinal o transversal deseada al pórtico. Además, este subsistema proporciona la medida de la potencia consumida en el movimiento longitudinal del pórtico mediante el cálculo de la fuerza aplicada por la velocidad. Para conseguir el movimiento del pórtico con respecto al suelo se emplea un bloque *Rectangular Joint*, el cual consiste en una articulación con dos grados de libertad, el movimiento en x y el movimiento en y. Dentro de este bloque se calcula el movimiento que tendrá el pórtico cuando se le apliquen las fuerzas de entrada, y, además, simula una fuerza de rozamiento mediante un modelo de fricción viscosa. Al final de este apartado se revisarán ciertas simplificaciones realizadas en el modelo, entre las cuales se justifica porque se emplea este modelo de fricción y no otro.

El siguiente subsistema, el cual puede verse en la Figura 33, es el que gestiona la conexión del pórtico con las ruedas, bajo el nombre de “Conexión Ruedas”.

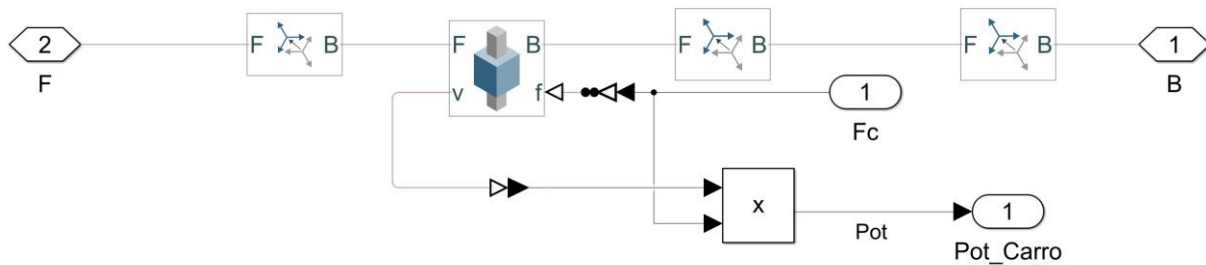
**Figura 33 Subsistema Conexión Ruedas**



Este subsistema se encarga de unir cada una de las ruedas al pórtico, entendiendo como ruedas los bogies, representados de forma simplificada como un bogie de un único eje. Para realizar estas uniones se cuenta para cada rueda con un pequeño subsistema dentro del cual encontramos un bloque *revolute joint*, el cual consiste en una articulación con un único grado de libertad, el cual es el giro de las ruedas sobre su eje vertical. Las entradas y salidas geométricas del subsistema son los sistemas de referencia geométricos, a partir de ahora *Frames*, del pórtico y las ruedas, y, la única entrada numérica es el ángulo de giro de las ruedas en grados.

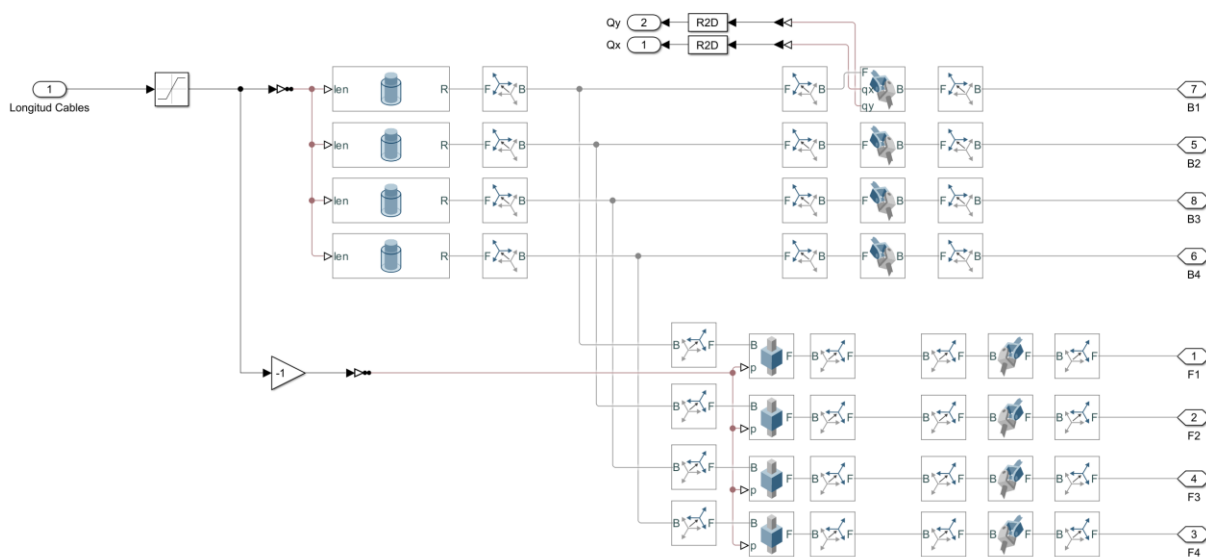
En el esquema general encontramos también el subsistema ‘‘Junta carro’’, presentado en la Figura 34. Este subsistema cuenta con una articulación prismática, la cual tiene como entrada la fuerza aplicada al carro, y proporciona como salida el desplazamiento del carro sobre el pórtico. Además, en este subsistema se calcula la potencia consumida por el movimiento del carro como la fuerza aplicada por la velocidad adquirida por el carro.

**Figura 34 Subsistema Junta carro**



El siguiente subsistema es el denominado ‘‘Cables’’. Se muestra en la Figura 35. Este es el sistema más complejo. Esto se debe a que es el encargado de simular los cables, además de unir estos cables con el carro y con el spreader. Los cables son cilindros de longitud variable, siendo esta longitud la única entrada numérica del subsistema. Las entradas y salidas geométricas de este subsistema son precisamente los *frames* del carro y el spreader.

**Figura 35 Subsistema Cables**

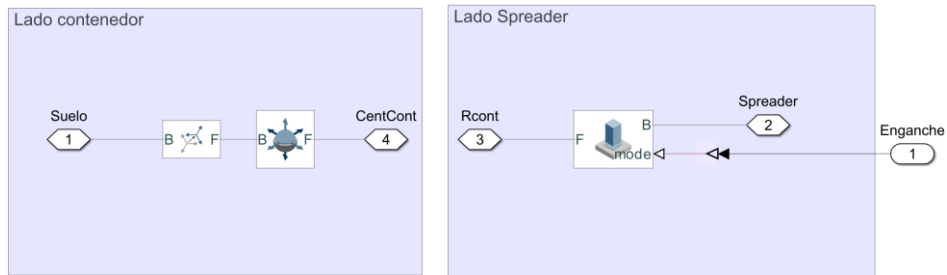


Los bloques de la izquierda del subsistema son *Variable Cylindrical Solid*, mediante los que se simulan los cables, mientras que los bloques de la parte derecha son bloques *Universal Joint* y *Prismatic Joint*.

Los bloques *Universal Joint* se emplean para permitir el movimiento de oscilación en los dos planos, YZ y XZ de los cables en su conexión con el carro y en su conexión con el spreader, mientras que los bloques *Prismatic Joint*, permiten el desplazamiento vertical de la carga cuando varía la longitud de los cables. De este subsistema salen dos variables,  $Q_y$  y  $Q_x$ , las oscilaciones del spreader en los dos planos.

El último subsistema del esquema del modelo de la grúa RTG simulada es el relativo a la conexión y desconexión del spreader con el contenedor, denominado "Enganche contenedor". Este subsistema se muestra en la Figura 36

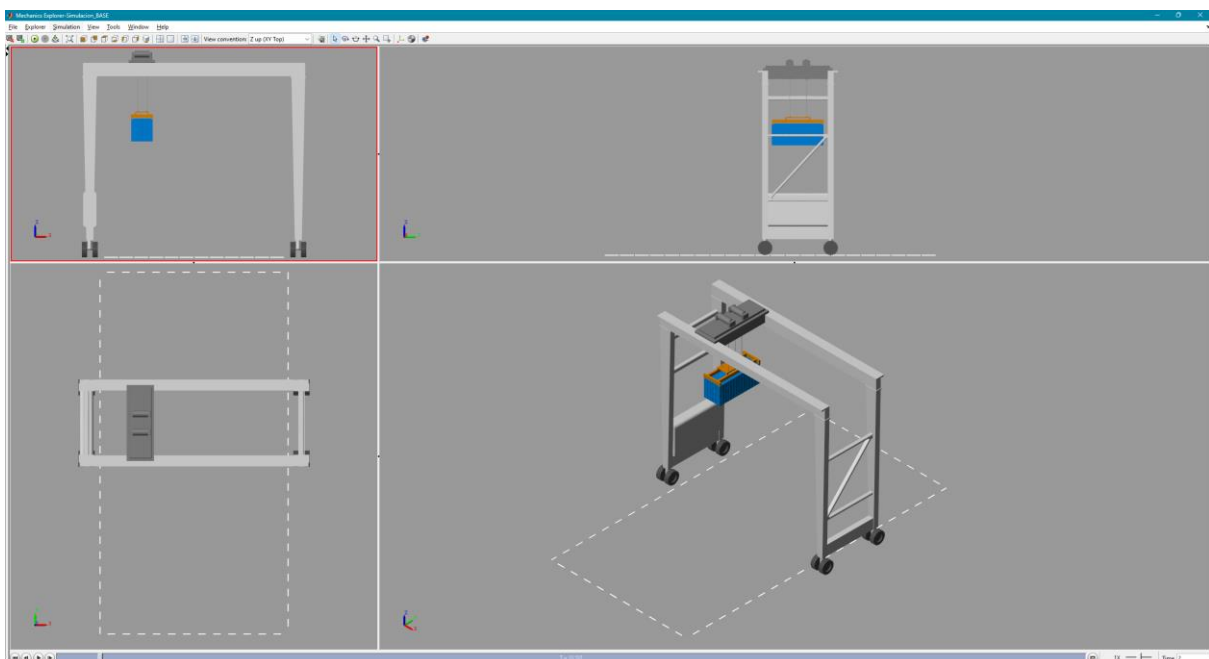
**Figura 36 Subsistema Enganche contenedor**



En este subsistema se encuentran dos partes diferenciadas, en la parte izquierda se conecta el suelo con un *frame* situado en el centro del contenedor mediante un bloque *6-DOF Joint*, el cual permite el movimiento libre del contenedor y establece un límite en el movimiento vertical a los 0 metros para simular el contacto con el suelo, mientras que, en la parte derecha se establece la conexión del contenedor con el spreader mediante un bloque *Weld Joint*, bloque que establece una conexión fija sin ningún grado de libertad entre el spreader y el contenedor cuando le llega una determinada señal.

Con esto queda definido de forma general el esquema diseñado en Simulink del modelo simulado de la grúa RTG. Con este esquema, aparte de poder observar todas las magnitudes medidas en forma de gráficas, también se puede observar el comportamiento de la grúa simulada mediante la ventana *Mechanism Explorer*.

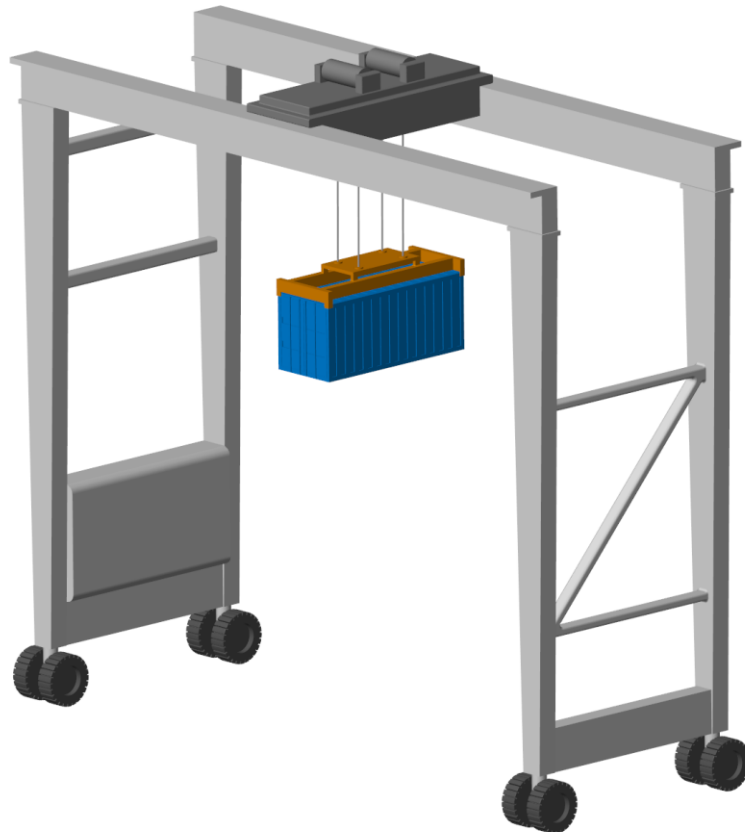
**Figura 37 Ventana Mechanism Explorer, representación gráfica de la simulación**





En esta ventana, que puede observarse en la Figura 37, se muestran todos los elementos de la grúa ensamblados formando el conjunto total, el cual, responde de manera realista a las entradas proporcionadas. En la Figura 37 se hace visible que se presentan cuatro vistas de la grúa, una frontal, una lateral, otra cenital y una última en ángulo vista desde arriba. De esta forma se pueden observar de forma fácil los movimientos del contenedor en sus tres ejes. El conjunto ensamblado de la grúa simulada con todos sus elementos puede observarse en la Figura 38.

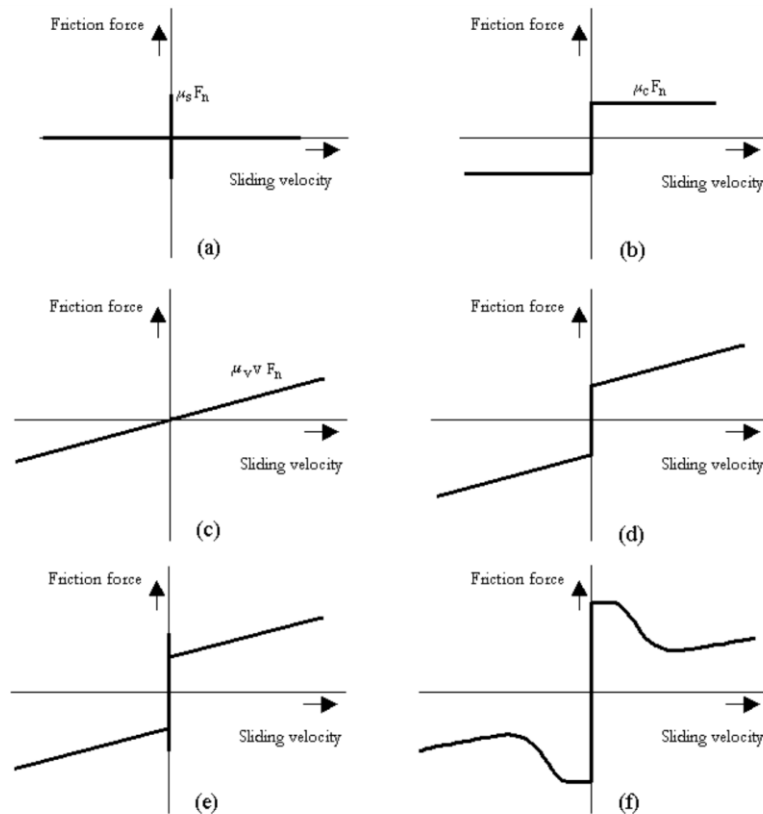
**Figura 38 Ensamblaje del modelo simulado de la grúa en Simscape**



Se deben comentar, antes de finalizar el apartado de la creación del modelo en Simulink, ciertas características y simplificaciones del modelo. Como se ha comentado, tanto la longitud como el ángulo de las ruedas son entradas que afectan directamente al valor de estos parámetros. Si se quisiera conseguir una simulación de la dinámica de estos movimientos, bastaría con cambiar la forma en la que estas entradas actúan sobre los bloques de las articulaciones a las cuales afectan, de forma que en vez de modificar las características de movimiento modificaran las características de fuerza, dejando las características de movimiento calcularse automáticamente en función de estas fuerzas. Debe tenerse en cuenta que, haciendo esto, se aumenta la complejidad del modelo, incrementando notablemente los tiempos de ejecución de las simulaciones.

Como última consideración del modelo, se aborda ahora la forma en que se simula la fricción y la justificación de la elección del método empleado. Para entender cómo se modela la fricción entre el pórtico y el suelo y la fricción entre el carro y el pórtico en este modelo, primero se van a estudiar algunos de los modelos de fricción más empleados. Estos modelos, que también son tratados como los componentes de la fricción se presentan en la Figura 39, atendiendo al comportamiento de la fuerza de fricción (eje  $y$ ) en función de la velocidad de desplazamiento, (eje  $x$ ).

**Figura 39 Modelos y componentes de la fricción, (a) fricción estática, (b) fricción de Coulomb, (c) fricción viscosa (d) Coulomb + fricción viscosa, (e) estática + Coulomb + fricción viscosa, (f) estática + Coulomb + fricción viscosa con efecto Stribeck (Rajapakshe, 2011)**



Estos modelos son empleados ampliamente para simular la fricción de diferentes elementos en su desplazamiento relativo. En nuestro caso, se decide emplear como simplificación a la simulación de la grúa RTG, el modelo de fricción viscosa, cuya fórmula es directamente (Universidad de Sevilla, 2009):

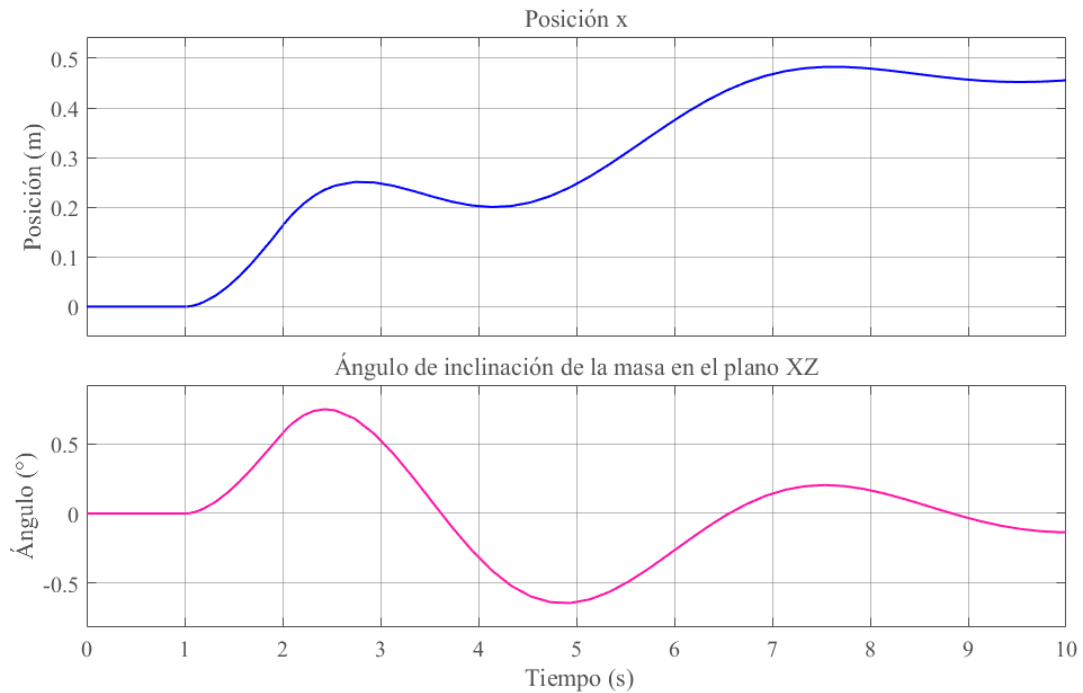
$$v(t) \neq 0 \quad F_f = -F_v \cdot v(t)$$

Siendo  $v$  la velocidad,  $F_f$  la fuerza de fricción y  $F_v$  una cierta constante. Este es un modelo de rozamiento sencillo que considera que la fuerza de rozamiento solo es proporcional a la velocidad y tiene sentido contrario a esta. A pesar de no ser el modelo más realista, presenta claras ventajas, sobre todo a la hora de la obtención de un control sobre el modelo simulado. Esto se debe a que, el resto de los modelos, que contemplan la fricción estática, incluyen una fuerte no linealidad debido al comportamiento de histéresis presente. Se toma la decisión de no incluir esta no linealidad a la hora de la propuesta de control del sistema de la grúa simulada, puesto que, de incluirla, el diseño de un sistema de control no podría basarse en la identificación de un sistema lineal subyacente a la planta a controlar, y sería necesario recurrir a algún sistema de compensación de la fricción o sistema de control adaptativo, los cuales no son objeto de estudio de este trabajo, debido a su excesiva complejidad, sobre todo, si deben ser compatibles con otras técnicas que sí se pretenden abordar para el control de la grúa RTG, como es la planificación de ganancias o el control anti-balanceo. El estudio de estas técnicas enfocadas en la compensación o limitación del efecto de la fricción en el control de procesos que la presenten ha sido, y sigue siendo una fuente de estudio en diversas universidades y centros de investigación (A. Bisoffi, 2020) (Jing Na, 2018) (H. Olsson, 1998).

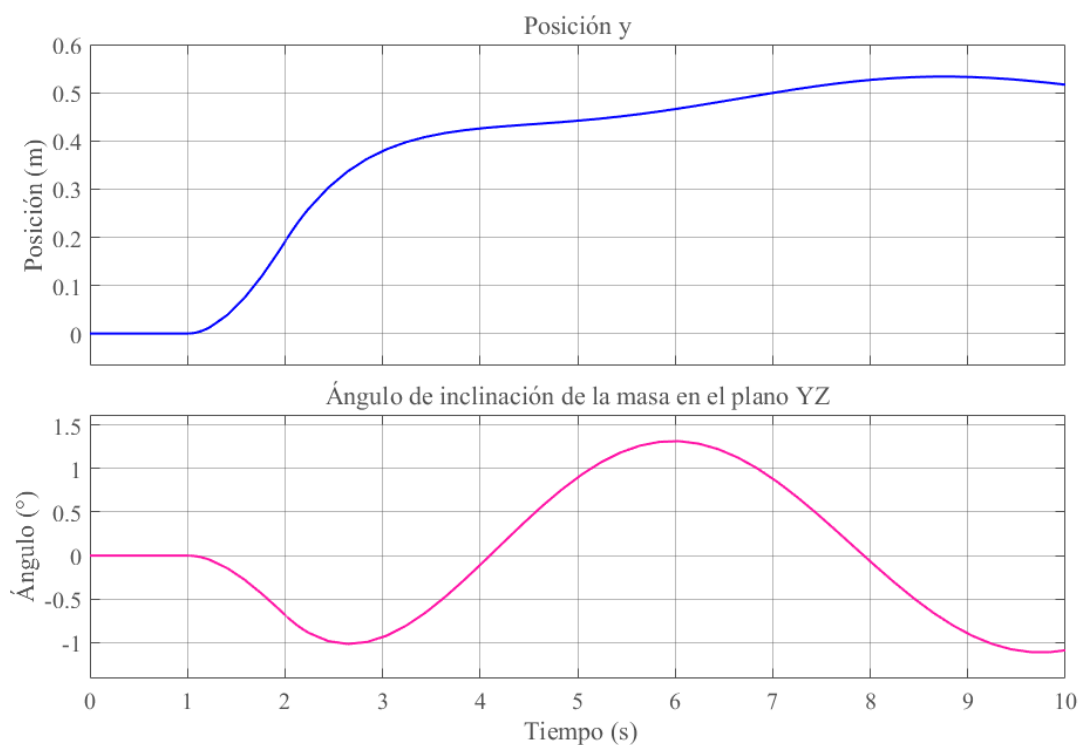
Para terminar con este capítulo se presentan los resultados de dos ensayos, en los cuales se aplica un impulso de fuerza durante un segundo al carro y al pórtico para comprobar la validez del modelo,

atendiendo al comportamiento de las salidas y a la comprobación visual de la respuesta de la grúa mediante el Mechanism Explorer. Estos impulsos son de 10 kN para el movimiento del carro y 100 kN para el movimiento del pórtico. Para estos ensayos se escoge una masa y longitud de cables similares a las empleadas en el apartado del modelo físico-matemático. En estos experimentos, presentados en las figuras 36 y 37, se mide solo la posición del carro y el ángulo de inclinación de la carga en sus dos direcciones.

**Figura 40 Simulación del movimiento del carro ante el modelo simulado, movimiento de carro**



**Figura 41 Simulación del movimiento del carro ante el modelo simulado, movimiento de pórtico**



Lo primero que debe comentarse sobre las figuras 36 y 37 es que el ángulo de inclinación que aparece cuando se desplaza el carro tiene sentido invertido con respecto a las simulaciones sobre el modelo físico-matemático debido a la configuración de ejes en Simscape multibody. Una vez aclarado esto, se puede establecer que estas respuestas tienen sentido, pues, aunque no son iguales a las del modelo físico-matemático, no deberían serlo, puesto que existe fricción. Por este motivo, tanto la posición como el ángulo en los dos movimientos presentan amplitudes menores. Además, las posiciones y los ángulos con el tiempo alcanzarán un punto de equilibrio, cosa que no ocurre con el modelo implementado con las ecuaciones diferenciales, puesto que no existe pérdida de energía.

Además, visualizando la ventana *Mechanism Explorer*, puede observarse el movimiento del contenedor suspendido en la grúa, comprobando que visualmente, su movimiento y oscilación son naturales, con un comportamiento similar al real. Nótese que esta herramienta proporciona un análisis más visual y subjetivo que matemático o analítico.

Como breve conclusión, estos resultados son adecuados a la naturaleza de la grúa RTG y su comportamiento, consiguiendo así, un modelo simulado válido de esta máquina, sobre el cual se planteará su control en los sucesivos capítulos.

# CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

## 4.1 INTRODUCCIÓN

Tras tener listo el sistema simulado de la grúa RTG, se plantea ahora el control de sus movimientos. Los movimientos que se controlarán mediante el sistema diseñado son: el movimiento del contenedor en su desplazamiento transversal ante el movimiento del carro, y el movimiento del contenedor de forma longitudinal ante el movimiento del pórtico. Se plantea para este sistema un control multilazo, descartando algoritmos de control centralizado multivariable, dado que los movimientos son independientes entre sí y el efecto cruzado de las entradas en salidas no controladas es prácticamente inexistente.

El problema fundamental que se trata en este apartado es que, a pesar de controlar solo 2 variables, existen ciertos parámetros cambiantes durante la operación de la grúa, que, a pesar de no ser objeto de control, afectan notablemente a la respuesta de las salidas a controlar. Estos parámetros son la masa del contenedor y la posición vertical del contenedor en cada momento, es decir, la longitud de los cables que sostienen al spreader. Para solucionar el efecto de la variación de estos parámetros sobre las salidas controladas el diseño de este sistema de control se basará en una estrategia conocida como planificación de ganancias, la cual se muestra en (D.J & WE., 2000) y (MathWorks, 2024).

## 4.2 ESTRUCTURA

Este capítulo se divide en cinco apartados, que reunirán las diferentes tareas necesarias para conseguir un sistema de control que mantenga un buen equilibrio entre eficiencia, robustez, rapidez y sencillez, puesto que más adelante se simulará la aplicación de este control dentro de un autómata programable.

En el primer subapartado se evalúa el comportamiento del sistema ante ciertas señales de entrada y ante la variación de los parámetros, sirviendo este apartado de análisis preliminar del cual extraer conclusiones relevantes para los posteriores subapartados. En el segundo subapartado se desarrolla de forma completa el diseño de los reguladores mediante el método de planificación de ganancias. En el tercer subapartado de este capítulo se llevan a cabo los ensayos pertinentes sobre el modelo simulado de la grúa para comprobar la validez del sistema de control diseñado. Tras estos apartados, se presenta en el cuarto subapartado el diseño de un nuevo sistema de control, basado también en la planificación de ganancias, pero más realista y proporcionando un mecanismo que reduce el balanceo del contenedor. El último subapartado se centra en las conclusiones y comparativa de los controles diseñados.

## 4.3 ENSAYOS PRELIMINARES

Antes de realizar los ensayos se debe de establecer la nomenclatura seleccionada para las entradas, salidas y parámetros variables del sistema. Esta nomenclatura coincide con la mostrada en el apartado 3.6.2 del anterior capítulo. Sin embargo, se vuelve a mostrar a continuación, puesto que para el control de los movimientos del contenedor no se emplearán todas las variables que proporciona el modelo simulado de la grúa.

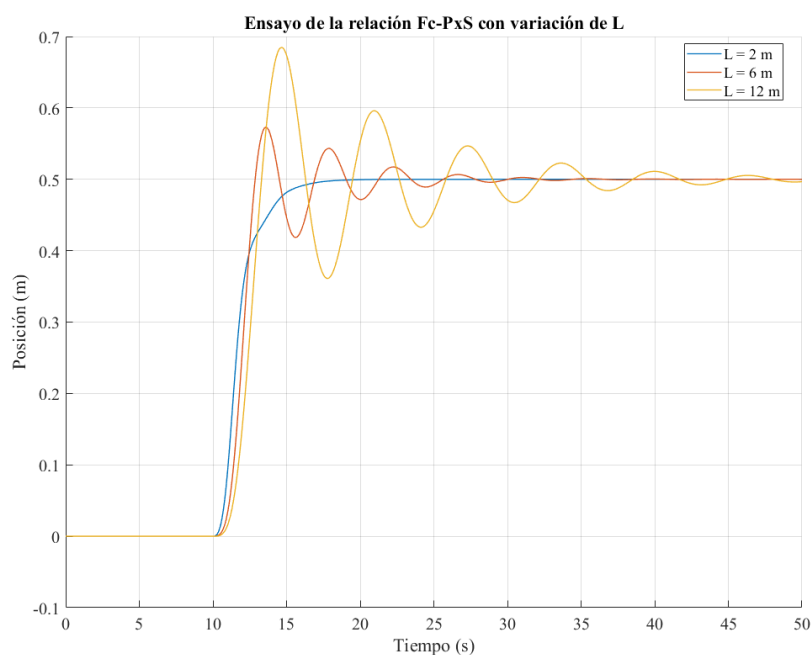
- Entradas
  - Fuerza aplicada al carro:  $F_c$
  - Fuerza aplicada al pórtico (fuerza motriz en las ruedas):  $F_y$
- Salidas
  - Posición x del contenedor o spreader:  $P_{xS}$
  - Posición y del contenedor o spreader:  $P_{yS}$
- Parámetros variables
  - Longitud de los cables:  $L$
  - Masa del contenedor:  $M_c$
- Otras variables de interés a monitorizar
  - Ángulo de oscilación del contenedor en el plano X-Z:  $Q_y$
  - Ángulo de oscilación del contenedor en el plano Y-Z:  $Q_x$
  - Potencia aplicada en el movimiento del carro:  $Pot_C$
  - Potencia aplicada en el movimiento del pórtico:  $Pot_{Py}$

Los ensayos que se realizarán tienen como primer objetivo entender la forma de la respuesta de las variables de salida ante la aplicación de determinadas señales de entrada, y, como segundo objetivo, evaluar el efecto de los parámetros variables en las salidas. Los ensayos preliminares realizados se dividen en función del par entrada-salida sobre el que se realizan.

### 4.3.1 Ensayos de la relación $F_c$ - $P_{xS}$

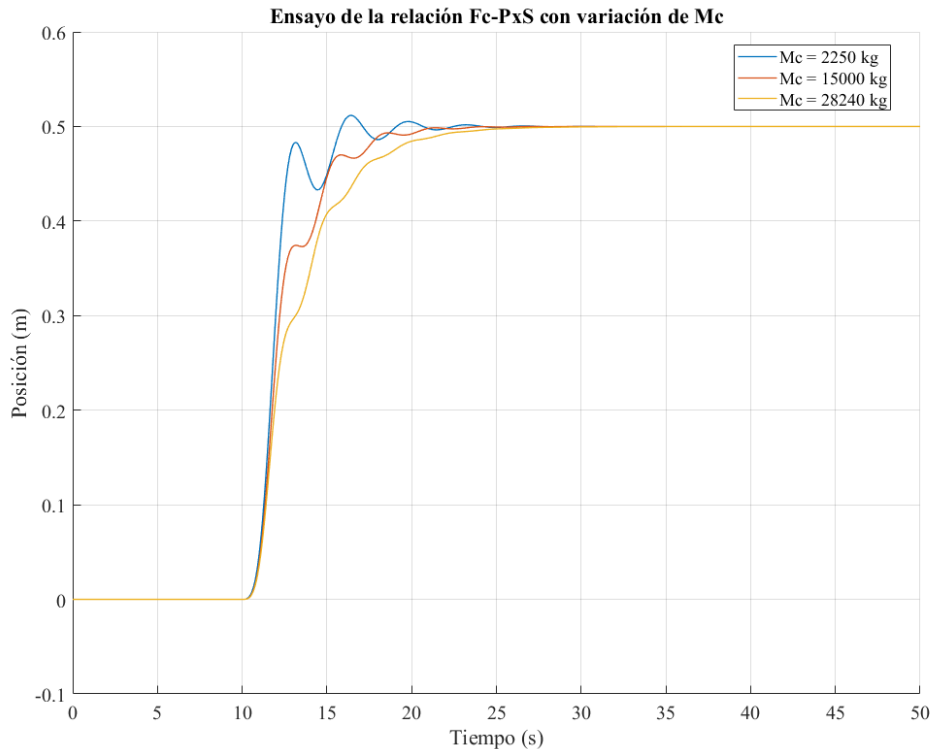
Se estudia con estos experimentos cómo es la respuesta de la posición del spreader en x ante un determinado impulso en la fuerza aplicada al carro. Este impulso es una fuerza de 10 kN aplicada durante un segundo, desde el segundo 10 hasta el 11. Además, este mismo ensayo se repite con tres longitudes distintas de cable, y con tres masas de contenedor. La comparativa entre la respuesta variando la longitud de los cables puede verse en la Figura 42. Puede observarse como a medida que los cables tienen mayor longitud, las sobreoscilaciones son mayores, como es lógico.

**Figura 42 Ensayo  $F_c$ - $P_{xS}$  con variación de  $L$**



En la Figura 43 se muestra el mismo ensayo, esta vez manteniendo una longitud de los cables de 4 m y variando la masa del contenedor entre tres valores, los cuales representan tres estados típicos, el contenedor vacío (2250 kg), el contenedor lleno (28240 kg) y una masa intermedia del contenedor (15000 kg). Se observa en este caso como la sobreoscilación es mayor en los casos de menos masa.

**Figura 43 Ensayo Fc-PxS con variación de Mc**

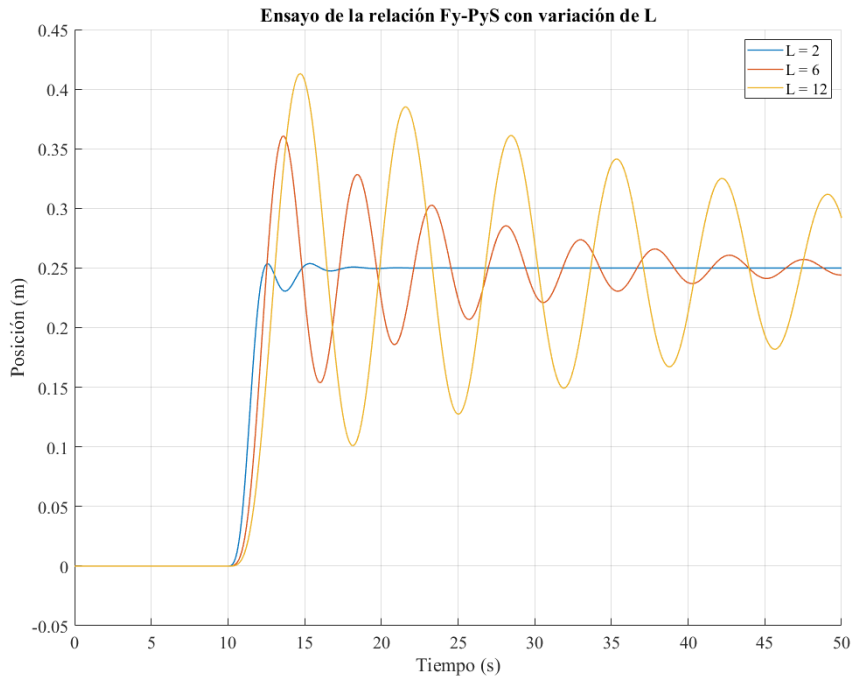


Las conclusiones generales de estos dos ensayos son que las variaciones de los parámetros L y Mc no afectan al valor final de la posición y principalmente afectan a la oscilación que esta salida experimenta. En cuanto a la respuesta de la posición x del contenedor ante la aplicación de una fuerza sobre el carro, se ajusta a un modelo de tercer orden con polos complejos conjugados y con integrador, puesto que estos ensayos son frente a un impulso. Si se realizaran frente a un escalón el valor de la salida no dejaría de aumentar.

### 4.3.2 Ensayos de la relación Fy-PyS

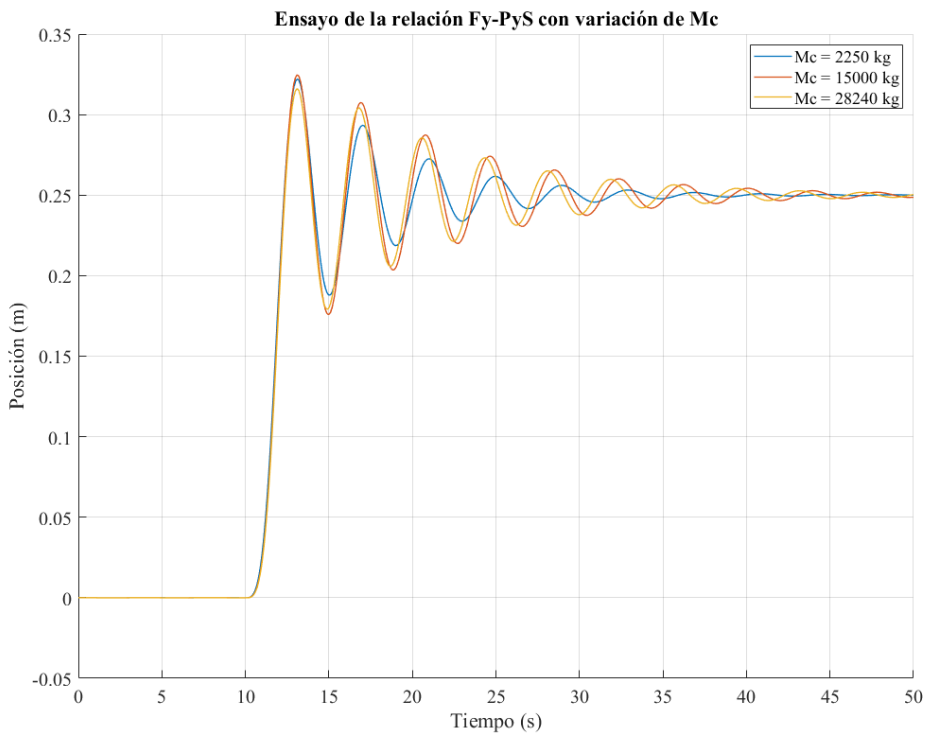
Se repite ahora el mismo esquema de ensayos mostrados antes, ahora para la relación de entrada-salida relativa al movimiento del contenedor en el eje y, a partir del movimiento del pórtico. En este caso, el impulso de un segundo se aplicará al pórtico para conseguir su desplazamiento, y, la fuerza aplicada tendrá un valor de 50 kN. En la Figura 44 se muestra el ensayo con las variaciones en la longitud de los cables. La conclusión que se extrae de este ensayo es la misma que para la anterior relación entrada-salida, a mayor longitud de los cables mayor es la sobreoscilación. Puede comprobarse que el efecto de la longitud de los cables en el desplazamiento del pórtico es más notable que en el desplazamiento del carro, siendo la diferencia entre la oscilación con una longitud de 2 m y la oscilación con una longitud de 12 m mayor en el caso de desplazamiento longitudinal.

**Figura 44 Ensayo Fy-PyS con variación de Mc**



En la Figura 45 se muestra el segundo ensayo realizado para esta relación entrada-salida, en esta figura se observa la diferencia en el comportamiento de la posición longitudinal del contenedor ante cambios en la masa de este. Se comprueba gracias a este ensayo que, en este movimiento, la masa no afecta tanto como en el movimiento transversal. Además, ahora, a mayor masa del contenedor la oscilación es mayor, aunque es difícil de ver esto en el inicio del movimiento por lo que parece ser alguna no linealidad que hace que el primer pico en el caso de la masa más pequeña sea mayor que el pico para la mayor masa.

**Figura 45 Ensayo Fy-PyS con variación de Mc**





La conclusión de estos ensayos sobre el movimiento del contenedor en su eje y se resumen en que, al igual que con el movimiento transversal, el modelo subyacente a estos movimientos es un modelo de tercer orden con integrador y polos complejos conjugados, y, por otra parte, se ha comprobado que la variación de la masa del contenedor y de la longitud de los cables tiene efecto sobre la oscilación de la salida.

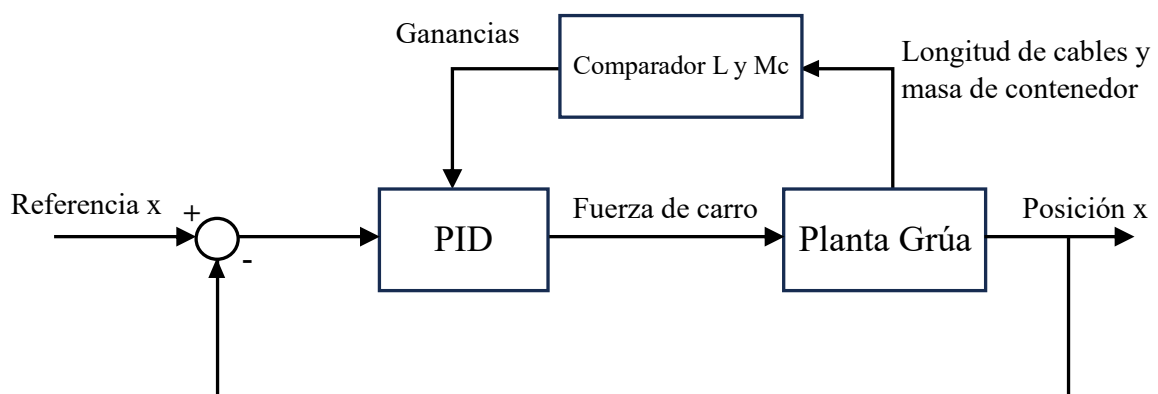
#### 4.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL POR PLANIFICACIÓN DE GANANCIAS

Se ha concluido con los anteriores ensayos que, en la planta a controlar, la posición del contenedor no es solo dependiente de las entradas, ni presenta un comportamiento lineal siempre, sino que presenta variaciones cuando dos parámetros, longitud de los cables y masa del contenedor, se ven alterados. Para diseñar un controlador capaz de controlar el sistema, se puede pensar en un primer momento en emplear un regulador complejo no lineal que sea capaz de tener en cuenta el detalle de las no linealidades del modelo y permitir un control en todo el rango de combinaciones de parámetros. Sin embargo, a la hora de diseñar un control, se deben buscar soluciones sencillas, que permitan una implementación fácil, y que, en la mayoría de las ocasiones proporcionan resultados adecuados sin la necesidad de recurrir a técnicas complejas. Es por este motivo por el cual en el diseño de los controladores para el sistema de la grúa RTG se va a optar por una técnica conocida como planificación de ganancias. A continuación, se describe el funcionamiento de esta técnica

Si bien, el movimiento del contenedor no es lineal en todo momento, sí que lo es para determinada combinación de los parámetros longitud de cable y masa de contenedor. Por tanto, se podría obtener un regulador lineal para esa determinada combinación. Sin embargo, al variar alguno de estos parámetros, el regulador ya no será capaz de mantener las mismas prestaciones. El planteamiento de la programación de ganancias es obtener un regulador lineal basado en ganancias y cambiar esas ganancias en función de los valores que tomen los parámetros variables, los cuales dentro de esta metodología se consideran variables de planificación, y serán entradas del sistema de control.

En nuestro caso, podemos obtener distintas ganancias de PID para combinaciones concretas de longitud de cable y masa del contenedor y podemos crear una tabla de decisión que determine que ganancias de PID se emplean dependiendo del valor de los parámetros. El esquema general de funcionamiento de este sistema está representado en la Figura 46, particularizado al movimiento en x, siendo el lazo de movimiento en y homólogo.

**Figura 46 Esquema general planificación de ganancias (elaboración propia)**



Para implementar el sistema de planificación de ganancias se deben seguir 4 pasos, los cuales son:

1. Linealizar la planta en cada condición operativa (punto de funcionamiento)
2. Sintonizar las ganancias del PID para cada condición definida
3. Escoger la arquitectura de planificación de ganancias e implementarla
4. Evaluar el rendimiento del control

Los siguientes subapartados muestran la realización de estos pasos.

#### 4.4.1 Linealización de la planta en cada condición operativa

En nuestro caso se seleccionan 12 puntos de funcionamiento que delimitarán 4 zonas para el parámetro masa de contenedor y 3 zonas para el parámetro longitud de cable. Estas zonas se pueden observar en la Tabla 11.

**Tabla 11 Puntos definidos para la identificación en la planificación de ganancias**

↑ Mayor masa de contenedor	<b>Longitud pequeña y masa grande</b>	<b>Longitud media y masa grande</b>	<b>Longitud grande y masa grande</b>
	L = 4 m Mc = 23520 Kg	L = 10,5 m Mc = 23520 Kg	L = 17 m Mc = 23520 Kg
	<b>Longitud pequeña y masa media</b>	<b>Longitud media y masa media</b>	<b>Longitud grande y masa media</b>
	L = 4 m Mc = 14100 Kg	L = 10,5 m Mc = 14100 Kg	L = 17 m Mc = 14100 Kg
	<b>Longitud pequeña y masa pequeña</b>	<b>Longitud media y masa pequeña</b>	<b>Longitud grande y masa pequeña</b>
	L = 4 m Mc = 4700 Kg	L = 10,5 m Mc = 4700 Kg	L = 17 m Mc = 4700 Kg
<b>Longitud pequeña y sin masa</b>	<b>Longitud media y sin masa</b>	<b>Longitud grande y sin masa</b>	
L = 4 m Mc = 0 Kg	L = 10,5 m Mc = 0 Kg	L = 17 m Mc = 0 Kg	
	→ Mayor longitud de cables		

La razón por la que se han escogido 3 condiciones operativas para la longitud y cuatro para la masa del contenedor se debe a que se pretende tener bien identificada la condición de spreader sin contenedor, puesto que es una situación común en la operativa de la grúa y es un punto con un comportamiento bastante alejado de la primera condición operativa con masa distinta de cero. En la Tabla 12 se muestran los rangos en los que operan las ganancias relativas a cada condición operativa:

**Tabla 12 rangos definidos para las ganancias**

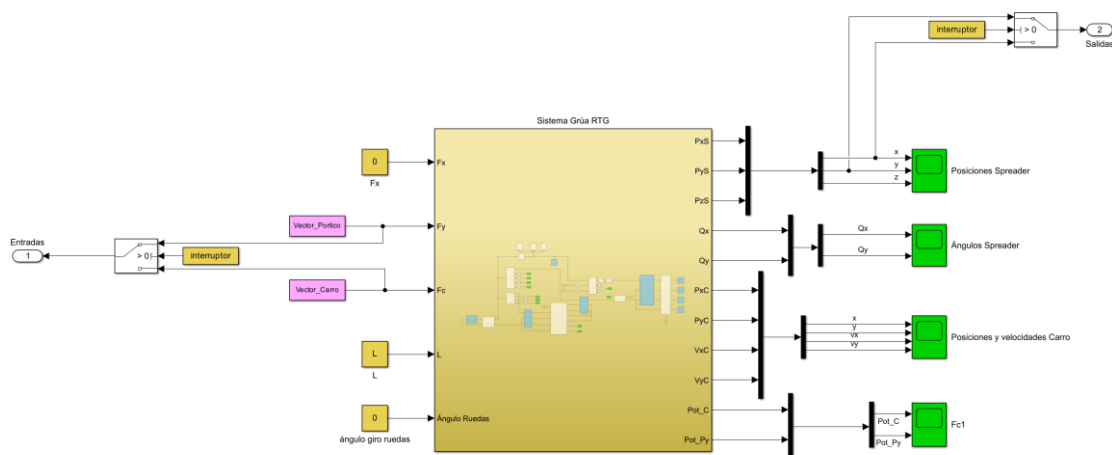
↑ Mayor masa de contenedor	<b>Longitud pequeña y masa grande</b>	<b>Longitud media y masa grande</b>	<b>Longitud grande y masa grande</b>
	Rango L = [1 7,4] m Rango Mc = [18827 28240] Kg	Rango L = [7,4 13,8] m Rango Mc = [18827 28240] Kg	Rango L = [13,8 20,13] m Rango Mc = [18827 28240] Kg
	<b>Longitud pequeña y masa media</b>	<b>Longitud media y masa media</b>	<b>Longitud grande y masa media</b>
	Rango L = [1 7,4] m Rango Mc = [9413 18827] Kg	Rango L = [7,4 13,8] m Rango Mc = [9413 18827] Kg	Rango L = [13,8 20,13] m Rango Mc = [9413 18827] Kg
	<b>Longitud pequeña y masa pequeña</b>	<b>Longitud media y masa pequeña</b>	<b>Longitud grande y masa pequeña</b>
	Rango L = [1 7,4] m Rango Mc = [100 9413] Kg	Rango L = [7,4 13,8] m Rango Mc = [100 9413] Kg	Rango L = [13,8 20,13] m Rango Mc = [100 9413] Kg
<b>Longitud pequeña y sin masa</b>	<b>Longitud media y sin masa</b>	<b>Longitud grande y sin masa</b>	
Rango L = [1 7,4] m Rango Mc = [0 100] Kg	Rango L = [7,4 13,8] m Rango Mc = [0 100] Kg	Rango L = [13,8 20,13] m Rango Mc = [0 100] Kg	
	→ Mayor longitud de cables		

Estos rangos han sido obtenidos dividiendo el rango de variación completo de los parámetros entre tres, y, para el parámetro relativo a la masa de contenedor además se ha añadido la condición de masa 0, que se tendrá en cuenta cuando no haya contenedor cargado.

Se debe tener en cuenta que estas doce condiciones operativas nos servirán para ajustar una estrategia de planificación de ganancias en dos reguladores, uno para el control del movimiento en el eje x, aplicando una determinada fuerza sobre el carro, y otro para el control del movimiento en el eje y, aplicando una determinada fuerza sobre las ruedas del pórtico.

Tras definir las condiciones operativas para las cuales se diseñarán los reguladores, se deben ahora identificar los modelos lineales asociados a cada condición. Para ello, se crea un modelo sencillo en Simulink, en el que únicamente se tiene el sistema de la grúa, unos vectores de entrada que representarán los experimentos de la identificación y dos bloques *outport* que permiten obtener los datos de las entradas y las salidas del sistema para poder identificar el modelo mediante código.

**Figura 47 Esquema Simulink para la identificación**



Con este modelo, se crea en Matlab un código donde se incluirán todos los pasos necesarios para la creación del sistema de planificación de ganancias. En este código, el primer paso es definir los puntos en los que se debe obtener un modelo lineal, y realizar sobre el sistema Simulink los ensayos pertinentes para obtener todos los datos. La sección de código donde se realiza lo descrito se presenta en el Código 2. En este código puede verse como se realiza un bucle para simular todas las combinaciones de masa de contenedor y longitud del cable, además la simulación se realiza dos veces en cada iteración, en una se obtienen los datos para la identificación del modelo relativo a una determinada condición operativa para el control de la posición x, simulando una cierta secuencia de fuerzas aplicadas sobre el carro, y, en la otra simulación, se obtienen los datos para la identificación del modelo relativo a las mismas condiciones operativas pero esta vez para el control de la posición y, simulando otra secuencia de fuerzas aplicadas sobre el pórtico.

Todos los datos obtenidos tras las simulaciones se almacenan en objetos *iddata* para poder ser procesados por la herramienta de identificación. Esta herramienta se emplea en la siguiente parte del código, mostrada en el Código 1. En este código simplemente se introducen los datos de las simulaciones en la herramienta de identificación (comando *procest*) y se identifica el modelo. Como se ha visto en los ensayos preliminares, el modelo que mejor ajusta al sistema real es un modelo de tercer orden con integrador, así que, se especifica a la herramienta que busque modelos de este tipo. Esto, igual que antes, se hace tanto para el movimiento en el eje x como para el eje y.

## Código 1 Planificación de ganancias: simulaciones y obtención de datos

### Carga de datos iniciales y disposición de los rangos de ganancias

```
load Datos_iniciales.mat

Num_L = 3;
Num_Mc = 4;

L_vec = [4 10.5 16];
Mc_vec = [0.1 4700 14100 23520];

IDATOS = cell(Num_L,Num_Mc);

Ts = 0.1;
Tend = 30;

vt = 0:Ts:Tend;
```

### Simulaciones sobre la grúa y obtención de datos

```
disp('Simulando ....., espere a que se presenten los resultados ')

tic;
for i = 1:Num_L
    for j = 1:Num_Mc

L = L_vec(i);
Mc = Mc_vec(j);

Vector_Carro = [0 0;10 0;10 10000; 11 10000; 11 0; Tend 0];
Vector_Portico = [0 0; Tend 0];
interruptor = -1;

[vt,estados,registrosC] = sim('Simulacion_RTG_ident.slx',vt); % Simulación de Movimiento de carro

entradasC = registrosC(:,1);
salidasC = registrosC(:,2);
IDATOS_C{i,j} = iddata(salidasC,entradasC,Ts);

Vector_Carro = [0 0; Tend 0];
Vector_Portico = [0 0;10 0;10 100000; 11 100000; 11 0; Tend 0];
interruptor = 1;

[vt,estados,registrosP] = sim('Simulacion_RTG_ident.slx',vt); % Simulación de movimiento de Pórtico

entradasP = registrosP(:,1);
salidasP = registrosP(:,2);
IDATOS_P{i,j} = iddata(salidasP,entradasP,Ts);
    end
end
Tsim = toc;
InformeSim = ['Simulación terminada con una duración de ', num2str(Tsim), ' segundos'];
disp(InformeSim)
```

## Código 2 Planificación de ganancias: obtención de modelos lineales

### Análisis de datos y obtención de modelos lineales

```
FDTs_C = cell(Num_L,Num_Mc);
FDTs_P= cell(Num_L,Num_Mc);

for i = 1:Num_L % Cada L
    for j = 1:Num_Mc % Cada M_c

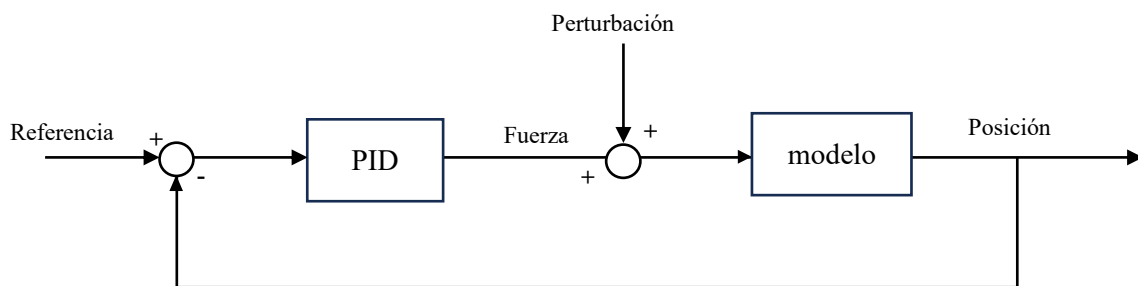
        opt = procestOptions('InitialCondition','zero');
        th_C = procest(IDATOS_C{i,j},'P3IU',opt); % se especifica el orden y forma del modelo
        th_P = procest(IDATOS_P{i,j},'P3IU',opt); % se especifica el orden y forma del modelo

        FDTs_C{i,j} = th_C;
        FDTs_P{i,j} = th_P;
    end
end
```

#### 4.4.2 Sintonizar las ganancias del PID para cada condición definida

Con todos los modelos para los dos movimientos de la grúa y todas las condiciones operativas obtenidas, ahora se deben sintonizar los PID para cada una de las condiciones y para los dos movimientos. Para ello se pueden emplear diferentes métodos, por una parte, se puede conseguir un ajuste rápido de los PID a partir de los modelos con el comando *pidtune*. Con este comando se puede especificar hasta cierto punto la forma del PID, si queremos que sea solo P, PI, PD, PID, PID con filtro de primer orden, etc. Además, también permite ajustarse a una cierta frecuencia de cruce objetivo, es decir, se puede establecer un cierto ancho de banda requerido para el control. Este método puede ser útil para una sintonización rápida de los PID pero, si se busca un ajuste del sistema a un cierto tiempo de establecimiento, sobreoscilación, tiempo de pico, etc. no es un método adecuado. Como alternativa a *pidtune* se tiene el comando *sys tune*, el cual es menos específico y más general, lo cual permite utilizarlo para múltiples tareas de sintonización. Con este comando es necesario disponer de un objeto en el que se codifique el bucle cerrado que se quiera controlar, con nuestro modelo de la planta y el controlador. El esquema que se generará para la sintonización de los PID será el mostrado en la Figura 48

**Figura 48 Esquema general para la sintonización de los controladores PID para planificación de ganancias (elaboración propia)**



Este esquema será igual para ambos ejes de desplazamiento del contenedor. Se ha añadido una perturbación en el esquema, que representa los posibles efectos de factores externos en la fuerza que mueve al contenedor, como podrían ser rachas de viento. El efecto de estas perturbaciones se representa en el código como un *Analysis Point* denominado X1, punto en el que el bucle puede ser abierto o desde el cual se pueden inyectar señales para especificar requerimientos del sistema.

El código para formar este sistema en bucle cerrado para los dos movimientos del contenedor y para obtener la sintonización de los reguladores es el mostrado en el Código 3. Este código se ejecuta en bucle para cada una de las condiciones operativas, y en él se definen los bucles cerrados donde se encuentran los reguladores, las referencias, el modelo de la planta para cada caso y la perturbación. Después, se definen unos requerimientos fuertes, que están relacionados con el tiempo de establecimiento y el error de posición y unos requerimientos débiles, que son los relacionados con el rechazo de las perturbaciones. Estos requerimientos se variarán hasta obtener una respuesta adecuada, con unos tiempos de establecimiento rápidos y sin sobreoscilación.

### Código 3 sintonización de los reguladores PID para la planificación de ganancias

```

% Se establecen los modelos
G_C = tf(FDTs_C{i,j});
G_P = tf(FDTs_P{i,j});

% se configuran los PID's a sintonizar
PID_sintonizar_C = tunablePID('PID_C','pd');
PID_sintonizar_P = tunablePID('PID_P','pd');

% Se añaden analysis points para tener en cuenta la perturbacion
X1_C = AnalysisPoint('X1_C');
X1_P = AnalysisPoint('X1_P');

% Se generan los bucles cerrados
CL_C = feedback(G_C*X1_C*PID_sintonizar_C,1);
CL_P = feedback(G_P*X1_P*PID_sintonizar_P,1);

CL_C.InputName = 'ref';
CL_C.OutputName = 'pos';

CL_P.InputName = 'ref';
CL_P.OutputName = 'pos';

% Requisitos de tiempo de establecimiento y rechazo de perturbaciones
Rref_C = TuningGoal.Tracking('ref','pos',10,0.01); % (Tiempo de respuesta, error en tanto por 1)
Rpert_C = TuningGoal.Gain('X1_C','pos',0.1); % (Limite de la ganancia entre X1 y la salida)

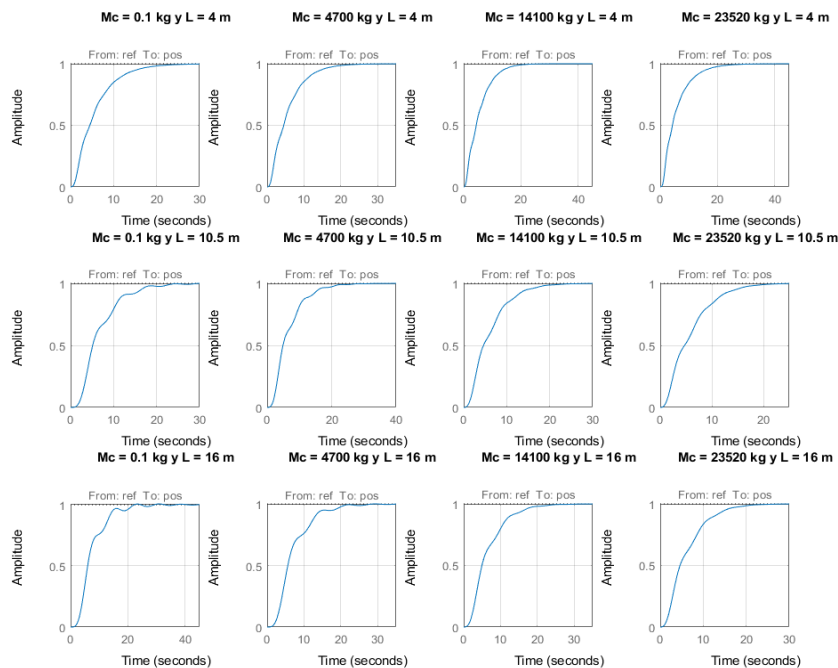
Rref_P = TuningGoal.Tracking('ref','pos',15,0.015); % (Tiempo de respuesta, error en tanto por 1)
Rpert_P = TuningGoal.Gain('X1_P','pos',0.01); % (Limite de la ganancia entre X1 y la salida)

% Se calculan los reguladores
[CL_sint_C,fSoft] = systune(CL_C,[Rpert_C],[Rref_C,]); % (especificaciones suaves, especificaciones fuertes)
[CL_sint_P,fSoft] = systune(CL_P,[Rpert_P],[Rref_P,]); % (especificaciones suaves, especificaciones fuertes)
BucleCerrado_C{i,j} = CL_sint_C;
BucleCerrado_P{i,j} = CL_sint_P;

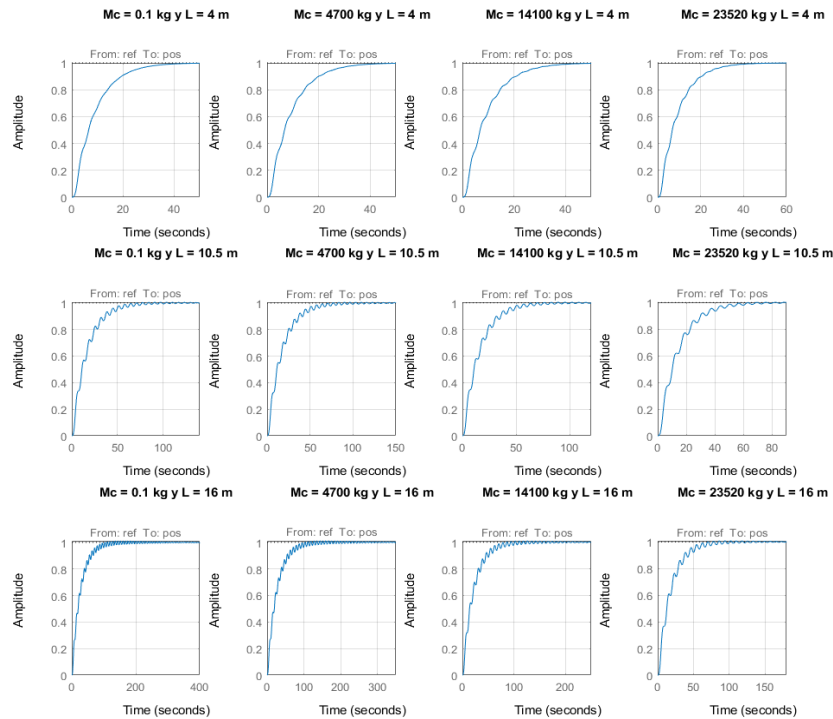
```

Tras el ajuste de los requisitos se consiguen las respuestas mostradas en la Figura 49 y en la Figura 50 ante un escalón de una unidad en la referencia y para todas las condiciones operativas. Nótese que estas respuestas son las proporcionadas por los modelos lineales configurados en los bucles cerrados.

**Figura 49 Respuesta en la posición x de los bucles cerrados lineales tras la sintonización de los reguladores PID**



**Figura 50 Respuesta en la posición y de los bucles cerrados lineales tras la sintonización de los reguladores PID**



Se puede apreciar como en los casos de control más sencillo, longitud de cables corta y masa grande, se consiguen las prestaciones establecidas, y según el control se va haciendo más complejo, los tiempos de establecimiento y la oscilación aumentan. Sin embargo, Se han definido unos requerimientos que tengan esto en cuenta y consigan en todos los casos la respuesta más rápida posible y con la menor oscilación.

#### 4.4.3 Esquema e implementación del control de ganancias

Ahora que se han obtenido los parámetros de todos los reguladores tipo PID para ambos movimientos y todas las condiciones operativas, el siguiente paso es definir de qué forma actuarán los reguladores con planificación de ganancias y crearlos.

La arquitectura más sencilla de planificación de ganancias consiste en cambiar las ganancias del regulador solo cuando se supere el umbral de una determinada condición de operación, de esta forma, el regulador mantendrá constantes sus ganancias siempre que se encuentre dentro de los rangos definidos para una determinada condición de operación y en el momento en que alguna de las variables supere dicho rango, en este caso según la Tabla 12, sus ganancias cambiarán a las asociadas a la nueva condición de operación.

Esta arquitectura no parece muy adecuada en un primer vistazo, debido a los transitorios que estos cambios generan. Para ejemplificar esto, se muestra a continuación un posible caso de transitorio no adecuado en la operación del movimiento del contenedor en el eje x. Se supone, sin pérdida de generalidad que nuestro regulador es un tipo P con dos únicas condiciones de operación para una sola variable, la longitud L de los cables. En este ejemplo la ganancia P será igual a 2000 cuando la longitud L sea menor a 10 m y será igual a 3000 si la longitud es mayor que 10 m. Con esta situación se pide a

la grúa mover el contenedor desde la posición 0 hasta los 6 metros en x. En el momento de iniciar el movimiento la longitud de los cables es de 11 metros, pero a lo largo del movimiento el contenedor debe ascender, por lo que la longitud L irá disminuyendo. Al inicio del movimiento la ganancia P es igual a 3000, pero en algún punto del recorrido la ganancia cambiará a 2000 por ser la longitud L menor a los 10 metros. En ese momento, el contenedor aún no habrá alcanzado los 6 metros que se pedían como referencia, sino que solo habrá llegado hasta los 3 metros. En el instante anterior al cambio de ganancia, la acción de control, que se puede calcular como  $P \cdot (\text{referencia} - \text{salida})$ , tendrá un valor de  $3000 \cdot (6 - 3) = 9000$  kN. Sin embargo, en el instante justo siguiente al cambio de ganancia, la nueva acción de control será  $2000 \cdot (6 - 3) = 6000$  kN. El error en estos instantes de tiempo no ha cambiado, sin embargo, la acción de control experimenta un cambio brusco que provocaría movimientos y oscilaciones repentinas sobre el contenedor.

A pesar de que esta arquitectura de planificación de ganancias no sea adecuada para emplearla sobre variables que cambian de forma continua, sí que podría ser una buena opción para ajustar el cambio de ganancia de los reguladores ante los cambios en la masa del contenedor, puesto que estos cambios no son continuos y solo se dan en los momentos de enganche y desenganche del contenedor al spreader, momentos en los que no hay ningún tipo de movimiento del contenedor sobre ningún eje. Aplicar esta arquitectura sobre la variable de la masa del contenedor además simplificará la arquitectura global del sistema de planificación de ganancia facilitando su implementación sobre los autómatas programables.

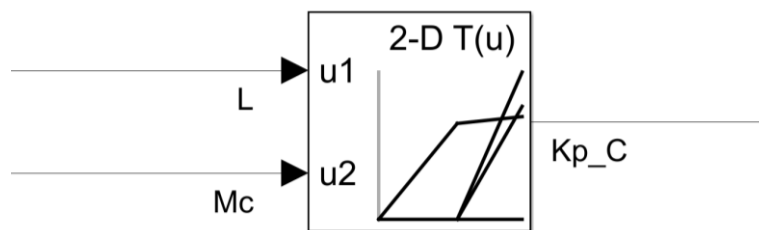
No obstante, por las razones antes mencionadas, esta arquitectura no es válida para los cambios en la longitud de los cables. Para solucionar este problema existen varias alternativas. La primera consiste en hacer que el cambio en las ganancias no sea instantáneo en el tiempo, sino que exista una rampa, durante un cierto periodo de tiempo, que permita que el cambio esté libre de transitorios. Este sistema no está exento de problemas, el mayor de ellos tiene que ver con la elección del periodo de tiempo durante el cual se aplica la rampa. Si el periodo es muy pequeño puede seguir habiendo comportamientos inadecuados cuando cambien las ganancias, y, por el contrario, si el periodo es muy grande, el cambio dejará de ser efectivo, puesto que el sistema no tendrá las ganancias que necesita durante un largo periodo de tiempo. Por estos motivos, la arquitectura seleccionada será la consistente en la creación de curvas de ganancia en función de los parámetros variables. Esta arquitectura consiste en la definición de una curva suave que defina el valor de la ganancia en función del parámetro variable, en nuestro caso la longitud L. Esta curva puede ser definida como una ecuación o como una serie de puntos en una tabla de la que se interpolan los valores intermedios. Esta es la mejor opción para el cambio de las ganancias en una estrategia de planificación de ganancias cuando los parámetros varían de forma continua en el tiempo, debido a que las ganancias siempre estarán cambiando de forma suave y tan rápido como cambie la variable de planificación.

Como elección final del esquema de planificación de ganancias se decide que el cambio de ganancias ante el cambio en el valor de la masa del contenedor sea instantáneo y no exista curva de interpolación, mientras que para el cambio en la longitud sí que existirán cuatro curvas, una por cada condición relativa a la masa, gracias a las cuales se obtendrán las ganancias adecuadas. Cabe mencionar que estas curvas se formarán mediante la interpolación lineal de los puntos de operación en los cuales están definidas las ganancias. Esta decisión tiene su justificación en que es un método sencillo para obtener estas ganancias, es fácil de implementar en un autómata programable y, además, no es necesario una curva más compleja puesto que no se requiere una extrema suavidad en el cambio, simplemente evitar los posibles transitorios y obtener un buen desempeño del sistema de control.



Tras definir la arquitectura del control de ganancias, el siguiente paso es implementarla. Aunque el objetivo de este trabajo es implementar el control en un PLC que pueda comunicarse con el modelo simulado de la grúa, simulando así un control más realista y parecido al que se podría llevar a cabo en una grúa real, primero se comprobará la validez del sistema de control diseñado implementándolo en Simulink. Para ello, el primer paso es guardar en vectores todas las ganancias obtenidas con la sintonización de los reguladores. Una vez hecho esto se genera un nuevo modelo de Simulink con PIDs que obtengan sus ganancias a través de bloques tipo *2-D lookup table*. Gracias a estos bloques se consigue una interpolación lineal de las ganancias en función de las variables de planificación. En la Figura 51 se muestra el ejemplo de uno de estos bloques.

**Figura 51 Ejemplo de bloque 2-D lookup table**



En este punto cabe mencionar que, de esta forma, no se consigue exactamente la arquitectura planteada, puesto que las ganancias también se interpolan linealmente según el valor de  $Mc$ . No obstante, el cambio en esta variable es instantáneo, como ya se ha mencionado, por tanto, no existe diferencia apreciable. Sin embargo, a la hora de implementar el algoritmo en el PLC, al tener que expresarlo en forma de código, se implementará de la forma establecida en los anteriores párrafos.

## 4.5 ENSAYOS SOBRE EL CONTROL PID DE LA GRÚA

Una vez se tiene preparado el sistema de control por planificación de ganancias en Simulink, se procede ahora a diseñar un ensayo mediante el cual comparar cualquier control, algoritmo o mejora que se diseñe. Para ello se plantea un ensayo de recogida y depósito de un contenedor, el cual cuenta con los siguientes pasos:

1. Recogida de un contenedor en origen
2. Elevación del contenedor
3. Traslado horizontal del contenedor al destino
4. Descenso del contenedor,
5. Depósito del contenedor en el destino
6. Elevación del spreader
7. Traslado horizontal del spreader al origen
8. Descenso del spreader

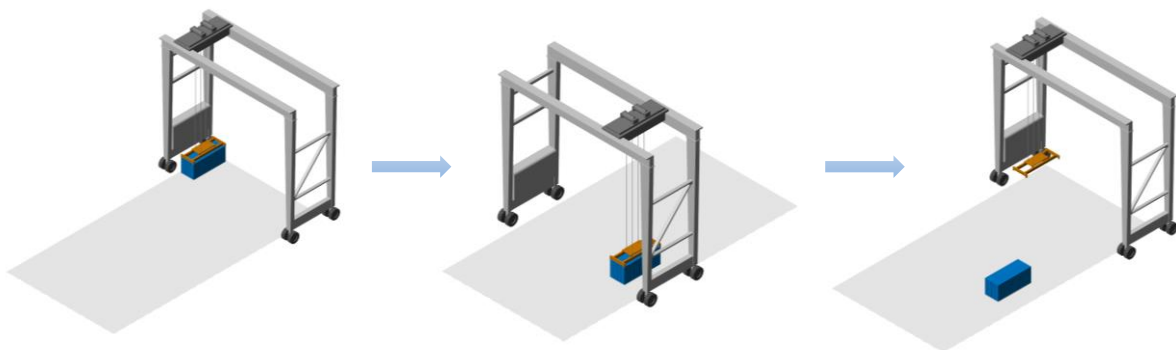
Se hace visible como el punto de inicio coincide con el de fin de la secuencia. Con estos pasos podrá comprobarse el correcto funcionamiento del método de planificación de ganancias al variar la longitud de los cables y la masa del contenedor, puesto que al depositar el contenedor la masa pasa a ser cero.

Este ensayo se codifica de forma modular en un código Matlab tipo *Live Script*, de forma que se puedan modificar de forma libre los parámetros de origen y destino, la masa del contenedor y la longitud que tienen los cables en el traslado horizontal. Este código completo está presente en el documento Anexo.

Además, en este código, las distancias se miden en unidades de contenedores, teniendo en cuenta la posición de cada contenedor dentro del bloque, de forma que, si se especifica un punto en (x,y) como el (1,4), esto representa la posición del contenedor dispuesto en la primera fila y cuarta columna, teniendo como origen la esquina superior izquierda. Las posiciones en z también están codificadas de esta forma, queriendo decir una z igual a 3, que el spreader se situará a una altura de 3 contenedores. Estos cálculos se hacen teniendo en cuenta las dimensiones de los contenedores de 20 pies.

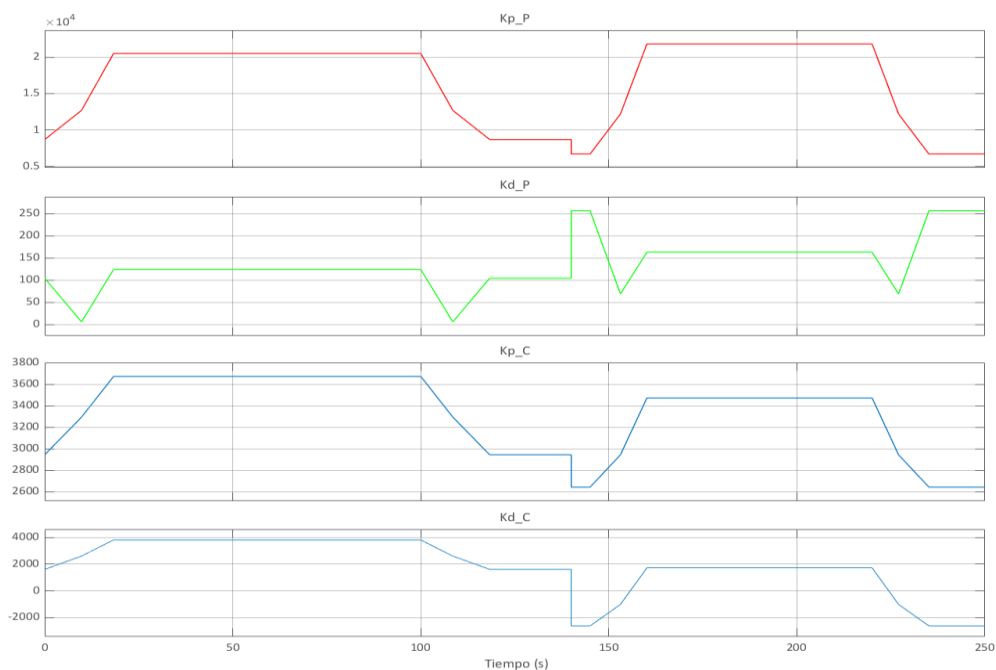
Los ensayos que se realizan a continuación parten del punto origen (1,1) y llegan hasta el (6,4). Partiendo de la altura más baja, subiendo hasta una altura de 6 contenedores y bajando de nuevo hasta la altura de un contenedor, considerando de esta manera que el contenedor se recoge y deposita directamente sobre el patio, y no encima de otro. La Figura 52 muestra tres puntos clave de la operación, de izquierda a derecha sería: recogida, depósito y vuelta al origen.

**Figura 52 Proceso de recogida y depósito de contenedor**



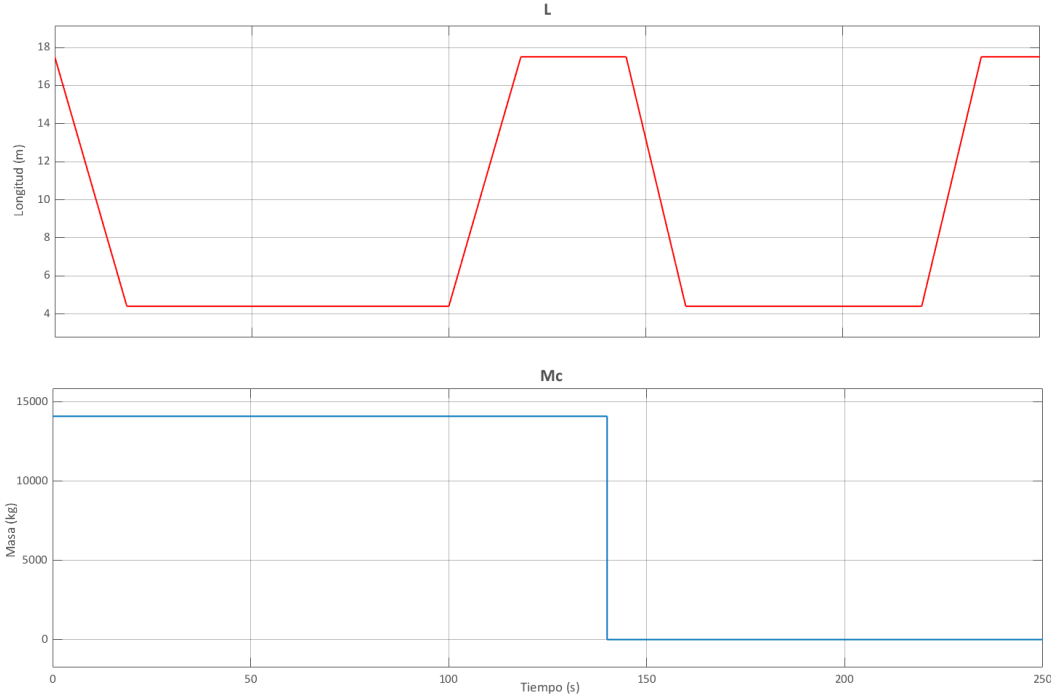
Tras la definición del ensayo, la primera prueba que debe realizarse es comprobar que efectivamente existe un cambio de ganancias de los reguladores cuando los parámetros L y Mc varían a lo largo del ensayo. Para esto se mide la salida de estos bloques 2-D lookup table, obteniéndose el resultado mostrado en la Figura 53.

**Figura 53 Variación de las ganancias a lo largo de la operación, control PID**



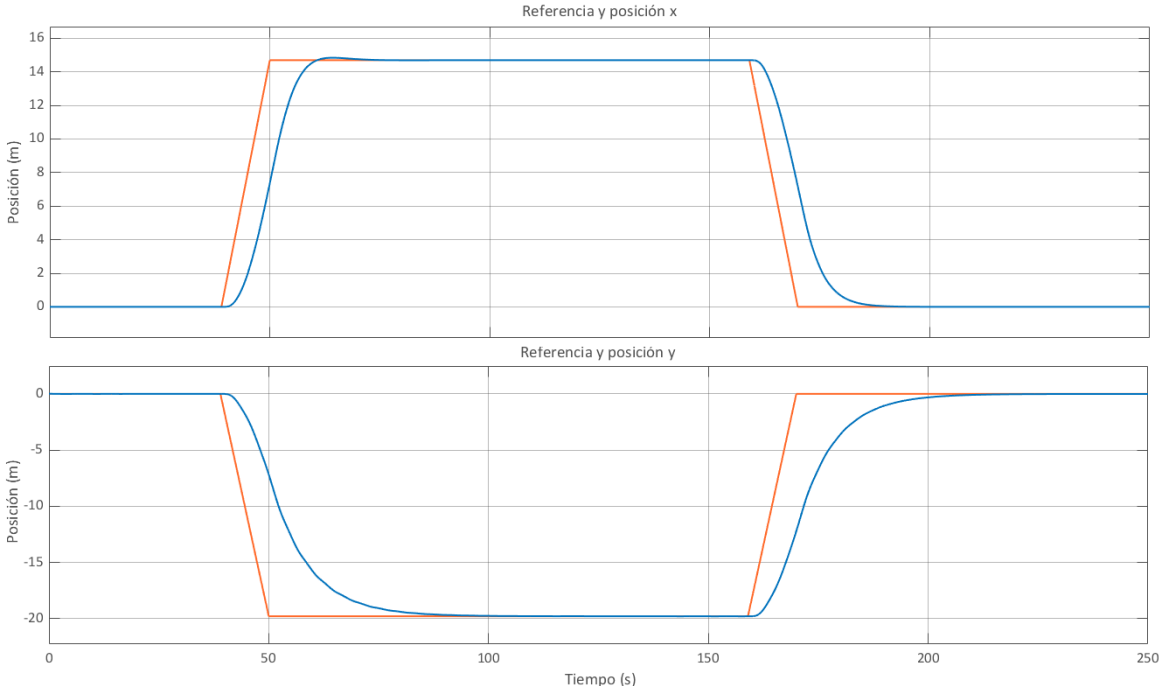
Esta figura se contrasta con la Figura 54 en la que se muestra la variación de las variables de planificación durante la operación ensayada, comprobando que, en efecto, los cambios de estas ganancias son coherentes con las variaciones de L y Mc.

**Figura 54 Variación de las variables de planificación a lo largo de la operación**



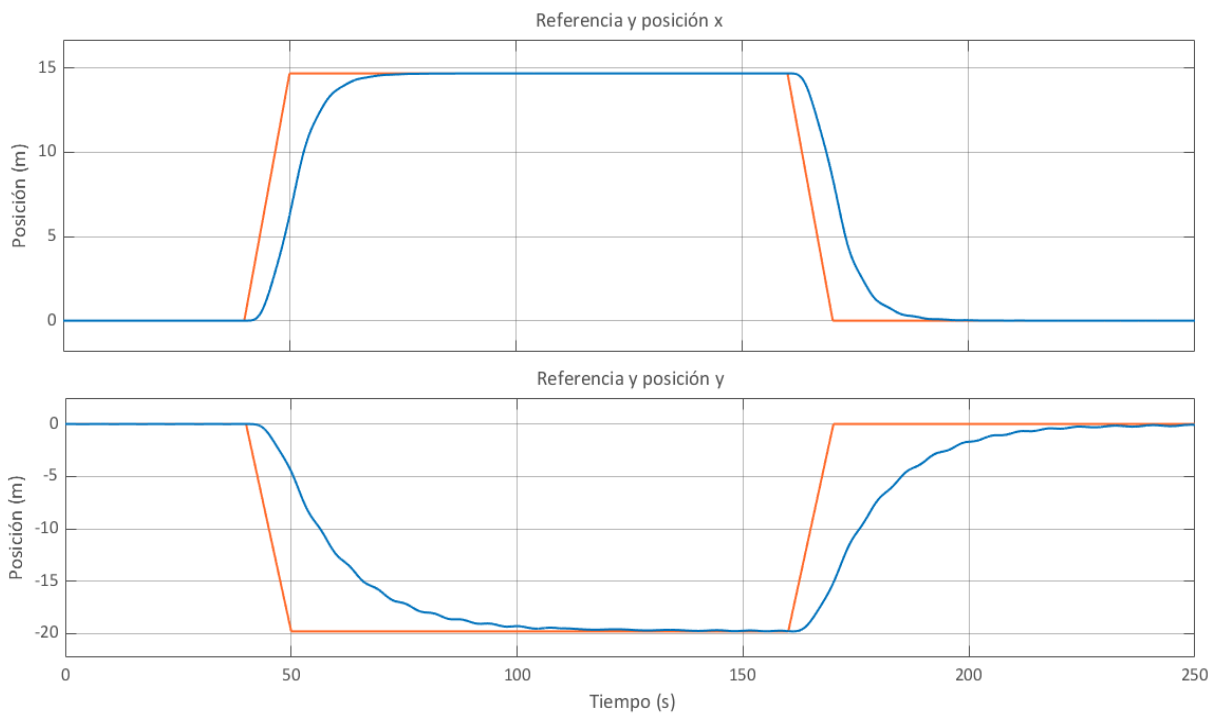
Lo siguiente que debe comprobarse es que se siguen las referencias en las posiciones horizontales del contenedor. En la Figura 55 se muestra el seguimiento de estas referencias, con el movimiento del carro para la posición x, y con el movimiento del pórtico para la posición y para el caso de una masa de 14800 kg.

**Figura 55 Seguimiento de referencias con planificación de ganancias y control PID, ensayo 1**



Como primer comentario a esta gráfica, la posición negativa del pórtico se debe a que el esquema comentado antes del bloque de contenedores comienza en el punto (1,1), estando este situado en la esquina superior izquierda, por tanto, al estar el eje y de Simscape Multibody apuntando hacia arriba, todos los movimientos del pórtico serán negativos. Se hace visible que el movimiento del pórtico es notablemente más lento que el del carro. Esto se debe a que se han tenido que relajar las restricciones de tiempo de establecimiento para la posición y, con el objetivo de disminuir las oscilaciones. Además, el cambio en las referencias no se realiza de forma instantánea, para no generar picos de fuerza y de potencia bruscos que excedan las capacidades de los motores. Estas salidas se evalúan para una serie de casos variando las posiciones de inicio y fin, las masas y longitudes de cables y como conclusión se obtiene que la respuesta se mantiene constante con ligeras variaciones. Se muestra a modo de ejemplo el seguimiento de referencias con una masa mucho menor, de unos 2500 kg, y una elevación durante los movimientos horizontales de tan solo 4 contenedores. Las salidas de este nuevo ensayo se muestran en la Figura 56.

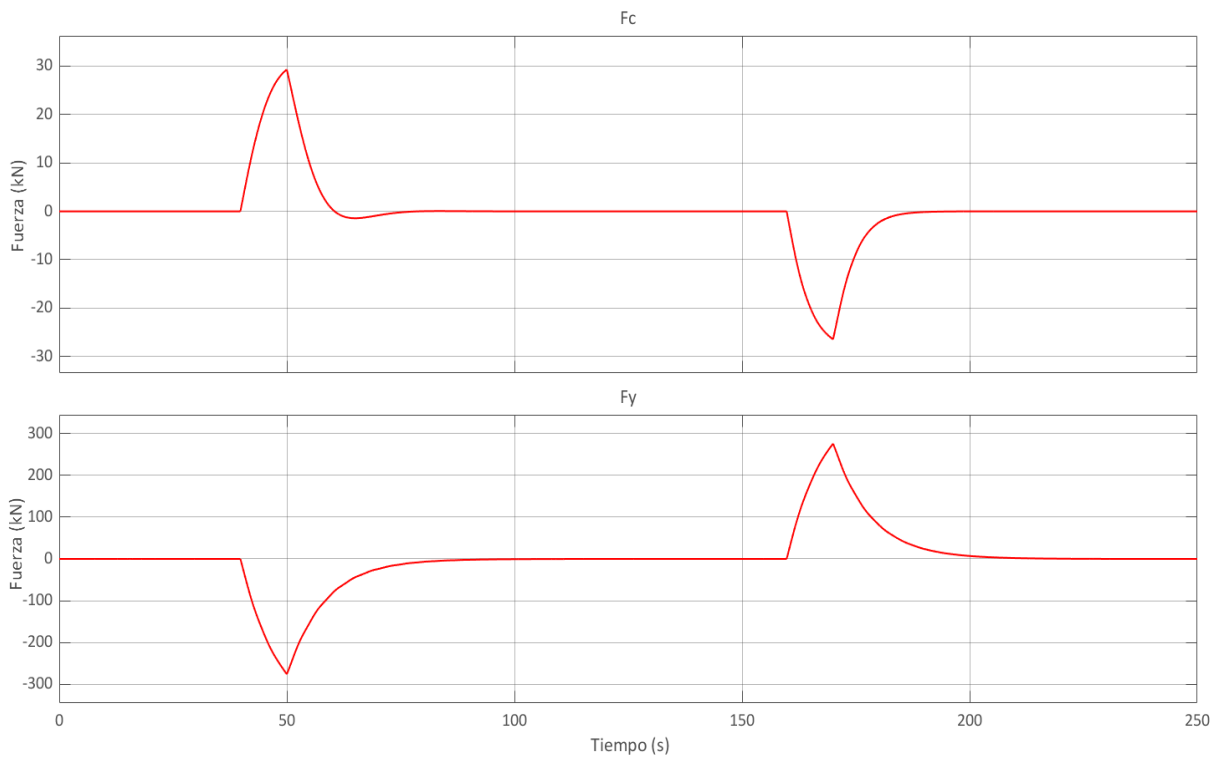
**Figura 56 Seguimiento de referencias con planificación de ganancias y control PID, ensayo 2**



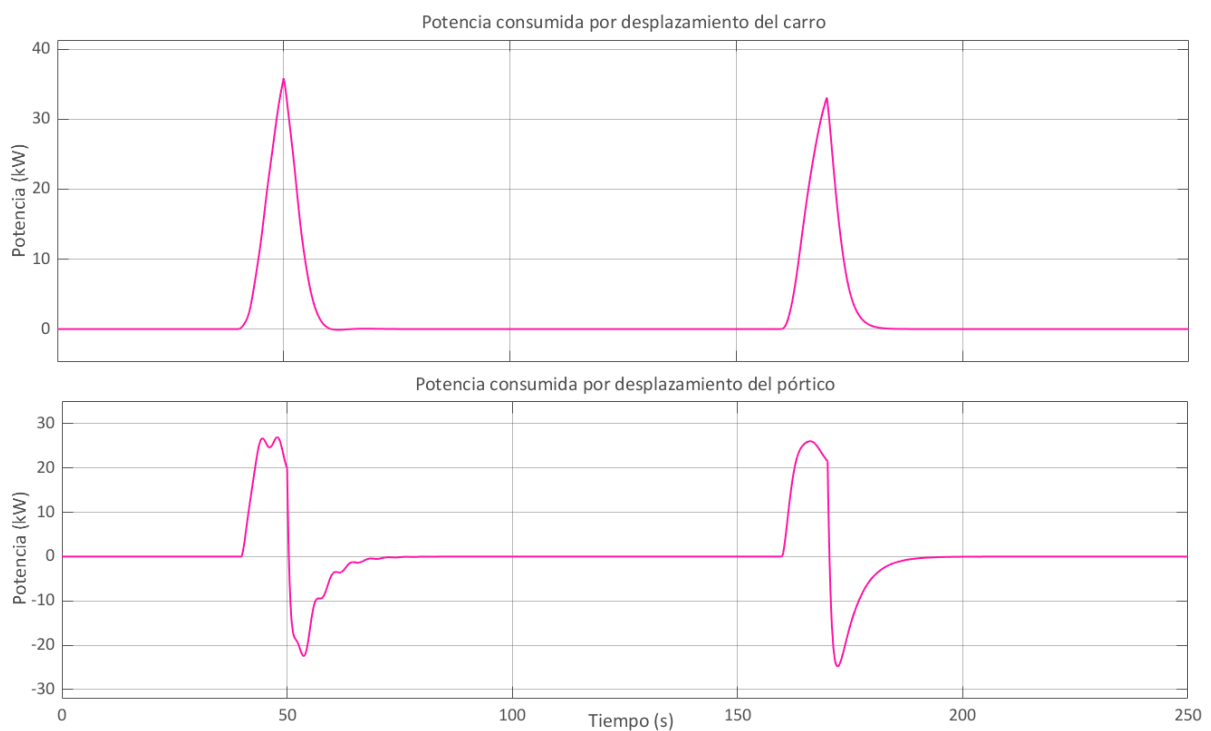
Se observa que no hay mucha diferencia con el caso anterior más allá de un aumento de las oscilaciones en el movimiento del pórtico. Se ha comprobado además que en todos los ensayos las velocidades tanto del carro como del pórtico son menores a los límites presentes en la Tabla 3.

Tras comprobar que las salidas se comportan de manera adecuada, se deben de comprobar las acciones de control y las potencias consumidas, asegurando que no superan los valores límites mostrados en las tablas del capítulo 3. Aunque se ha comprobado que todas las potencias y fuerzas son adecuadas en diferentes ensayos, solo se mostrará a modo de ejemplo la situación más desfavorable, correspondiente a la mayor masa y distancia. En la Figura 57 se muestra la evolución de las acciones de control, y en la Figura 58 la evolución de las potencias. Teniendo en cuenta las potencias máximas mostradas en el capítulo anterior (36 kW en el movimiento del carro y 160 kW en el movimiento del pórtico), se comprueba que no se sobrepasan en ningún momento.

**Figura 57 Acciones de control con planificación de ganancias y control PID**

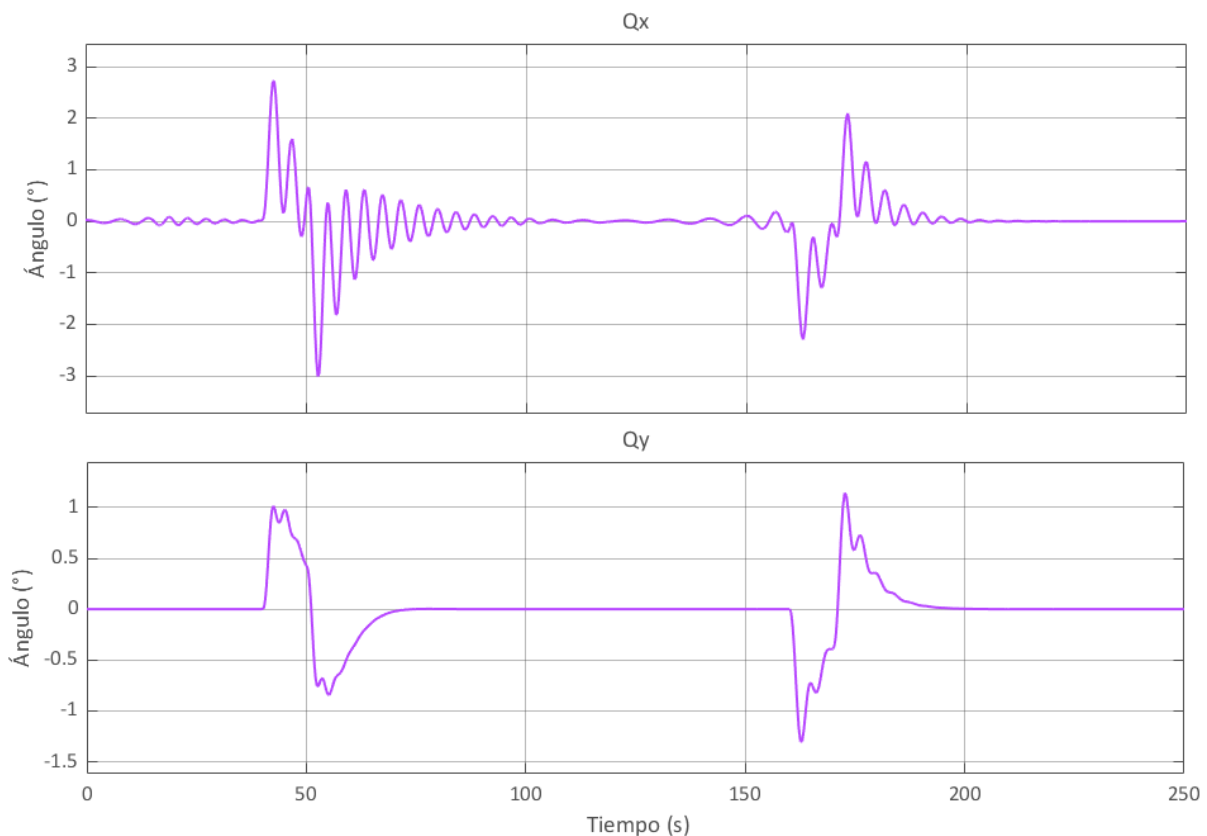


**Figura 58 Potencias con planificación de ganancias y control PID**



Como última comprobación, se debe observar la oscilación del contenedor, con las medidas de los ángulos  $Q_x$  y  $Q_y$ . La evolución de estos valores se muestra en la Figura 59. En esta figura se muestra el ejemplo de esta oscilación para las mismas condiciones estándar consideradas para la Figura 55.

**Figura 59 Ángulos de oscilación del contenedor con planificación de ganancias y control PID**



Se comprueba en esta figura que estos ángulos de oscilación son mayores a un grado, alcanzando en el caso del ángulo  $Q_x$ , relativo al movimiento del pórtico, casi los tres grados. Aunque esto no son valores demasiado elevados, deben considerarse varias cuestiones, la primera es que estas oscilaciones repercuten directamente sobre la posición del contenedor, y, cuanto mayor sea la longitud de los cables, mayor será este efecto. Y, la segunda consideración, tiene que ver con el mantenimiento de estas oscilaciones en el tiempo. Este mantenimiento de las oscilaciones se ve claramente en el primer movimiento del pórtico, en la primera respuesta de  $Q_x$  en la Figura 67. Estas oscilaciones hacen que, para que no se vean reflejadas en el movimiento del contenedor, el regulador PID deba ser mucho más conservador, impidiendo conseguir tiempos de establecimiento más rápidos.

Como conclusión a este control mediante un único regulador PID controlando la posición del spreader, y, por tanto, del contenedor, se debe considerar lo siguiente: Es un control aceptable, con tiempos de establecimiento alrededor de los 50 y los 100 segundos, para la posición del carro y el pórtico respectivamente, lo cual es un poco lento, comparado con las velocidades máximas que puede alcanzar el equipo. Estos lentos tiempos de establecimiento son los únicos posibles si quiere reducirse al máximo la amplitud de las oscilaciones y evitar una sobreoscilación fuerte de la posición. Sin embargo, no es el mejor control posible, precisamente por estas oscilaciones no controladas y los altos tiempos de establecimiento.

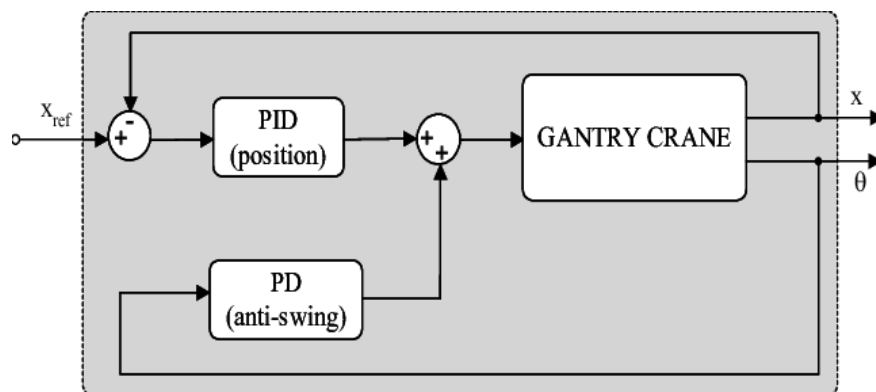
Además, llevar a cabo este control requeriría disponer de sensores que permitan obtener la posición del spreader, siendo esto una tarea difícil, puesto que los sensores que suelen emplearse en estas máquinas son encoders que miden la posición del carro y los ángulos de oscilación  $Q_x$  y  $Q_y$ .

## 4.6 SISTEMA DE CONTROL ANTI-BALANCEO

Por los motivos presentados antes, se plantea en los siguientes subapartados un nuevo esquema de control de la posición del contenedor, basado esta vez en las medidas de la posición longitudinal y transversal del carro, la cual es fácil de obtener en la realidad, por ejemplo, mediante encoders para la posición transversal y mediante un sistema DGPS para la posición longitudinal del pórtico dentro del bloque, y de los ángulos de inclinación  $Q_x$  y  $Q_y$ . De esta forma, si la posición del carro llega a su valor de referencia y los ángulos de inclinación son pequeños, esta posición coincidirá con la posición del spreader.

Este nuevo sistema de control permitirá una reducción del balanceo, así como una mejora de las prestaciones en comparación con el control PID calculado. El esquema empleado se basa en un control con dos medidas dentro de cada lazo ya existente, relativo al control de la posición  $x$  y la posición  $y$ . Este control consta ahora de dos reguladores PID's dispuestos tal como se muestra en la Figura 60.

**Figura 60 Diagrama de un control anti-balanceo (Solihin, 2008)**



Este nuevo esquema empleado también hará uso de la planificación de ganancias para obtener los parámetros de los PID's. Sin embargo, para la identificación de las ganancias de cada punto de operación, se realizará esta vez un proceso manual, simulando dentro del modelo de la grúa RTG cada una de las condiciones operativas y variando de forma manual, o con ayuda del sistema de sintonización automático de Matlab las ganancias de los reguladores, y observando la respuesta de la posición del carro y las oscilaciones hasta conseguir las especificaciones deseadas. De esta forma se conseguirá entender mejor el efecto de las ganancias de estos reguladores en el comportamiento del sistema, y, además facilita mucho la tarea de selección de ganancias, puesto que, al existir ahora dos reguladores para dos medidas distintas, la programación de una automatización para la obtención de las ganancias implica una dificultad muy elevada, junto con largos tiempos de computación.

Para simplificar el control, y plantear una forma sencilla de los reguladores que no supongan un elevado número de ganancias a calcular se considera el regulador que controla la posición un regulador P, y el que controla las oscilaciones un regulador PD. Esto tiene su justificación en que, el proceso ya cuenta con integrador así que no es necesario acción integral en el control de la posición, como se ha visto en el control del apartado anterior. Además, el controlador PD encargado de controlar los ángulos de inclinación hace que no sea necesaria acción derivativa en el PID reservado para controlar la posición.

Tras plantear un esquema sencillo en Simulink siguiendo el diagrama mostrado en la Figura 60, se procede a realizar ensayos para cada movimiento de la grúa y para cada punto de operación.

Estos ensayos corresponden a cambios en las referencias de tipo escalón y con un valor final de 1 metro tanto en la posición del carro como del pórtico. Se establecen como objetivos una sobreoscilación en la posición menor al 1%, y unas oscilaciones menores a 0.5°. En estos ensayos se hace visible el efecto de cada una de las ganancias en el desempeño del sistema. La ganancia  $K_p$ , relativa al regulador P que controla la posición permite aumentar la velocidad de respuesta de la posición, sin embargo, valores muy elevados repercuten en grandes sobreoscilaciones. Las ganancias  $K_p$ ,  $K_p$ \_theta y  $K_d$ \_theta, consiguen reducir muy notablemente las oscilaciones del contenedor, sin embargo, si se aumentan mucho sus valores reducen altamente los tiempos de establecimiento. Tras el ajuste manual de las tres ganancias a cada punto de operación de forma que en todos los puntos se consigan las especificaciones propuestas se obtienen las siguientes combinaciones de ganancias para cada condición. En la Tabla 13 se muestran las combinaciones relativas al movimiento del carro y en la Tabla 14, las relativas al movimiento del pórtico.

**Tabla 13 Ganancias sintonizadas para el sistema anti-balanceo, movimiento x**

Longitud pequeña y masa grande	Longitud media y masa grande	Longitud grande y masa grande
$K_p = 2600$ $K_p$ _theta = -10 $K_d$ _theta = -10	$K_p = 2800$ $K_p$ _theta = -10 $K_d$ _theta = -10	$K_p = 2800$ $K_p$ _theta = -1 $K_d$ _theta = -1
Longitud pequeña y masa media	Longitud media y masa media	Longitud grande y masa media
$K_p = 3100$ $K_p$ _theta = -500 $K_d$ _theta = -150	$K_p = 3300$ $K_p$ _theta = -50 $K_d$ _theta = -50	$K_p = 3400$ $K_p$ _theta = -10 $K_d$ _theta = -10
Longitud pequeña y masa pequeña	Longitud media y masa pequeña	Longitud grande y masa pequeña
$K_p = 3000$ $K_p$ _theta = -900 $K_d$ _theta = -150	$K_p = 3500$ $K_p$ _theta = -900 $K_d$ _theta = -150	$K_p = 3800$ $K_p$ _theta = -700 $K_d$ _theta = -120
Longitud pequeña y sin masa	Longitud media y sin masa	Longitud grande y sin masa
$K_p = 3000$ $K_p$ _theta = -2000 $K_d$ _theta = -100	$K_p = 3500$ $K_p$ _theta = -2000 $K_d$ _theta = -100	$K_p = 3800$ $K_p$ _theta = -1000 $K_d$ _theta = -100

**Tabla 14 Ganancias sintonizadas para el sistema anti-balanceo, movimiento y**

Longitud pequeña y masa grande	Longitud media y masa grande	Longitud grande y masa grande
$K_p = 36000$ $K_p$ _theta = 32000 $K_d$ _theta = 35000	$K_p = 38000$ $K_p$ _theta = 25000 $K_d$ _theta = 25000	$K_p = 42000$ $K_p$ _theta = 20000 $K_d$ _theta = 20000
Longitud pequeña y masa media	Longitud media y masa media	Longitud grande y masa media
$K_p = 36000$ $K_p$ _theta = 30000 $K_d$ _theta = 35000	$K_p = 38000$ $K_p$ _theta = 30000 $K_d$ _theta = 20000	$K_p = 40000$ $K_p$ _theta = 20000 $K_d$ _theta = 10000
Longitud pequeña y masa pequeña	Longitud media y masa pequeña	Longitud grande y masa pequeña
$K_p = 35000$ $K_p$ _theta = 30000 $K_d$ _theta = 30000	$K_p = 39000$ $K_p$ _theta = 28000 $K_d$ _theta = 28000	$K_p = 40000$ $K_p$ _theta = 20000 $K_d$ _theta = 15000
Longitud pequeña y sin masa	Longitud media y sin masa	Longitud grande y sin masa
$K_p = 30000$ $K_p$ _theta = 20000 $K_d$ _theta = 20000	$K_p = 35000$ $K_p$ _theta = 20000 $K_d$ _theta = 20000	$K_p = 40000$ $K_p$ _theta = 17000 $K_d$ _theta = 17000

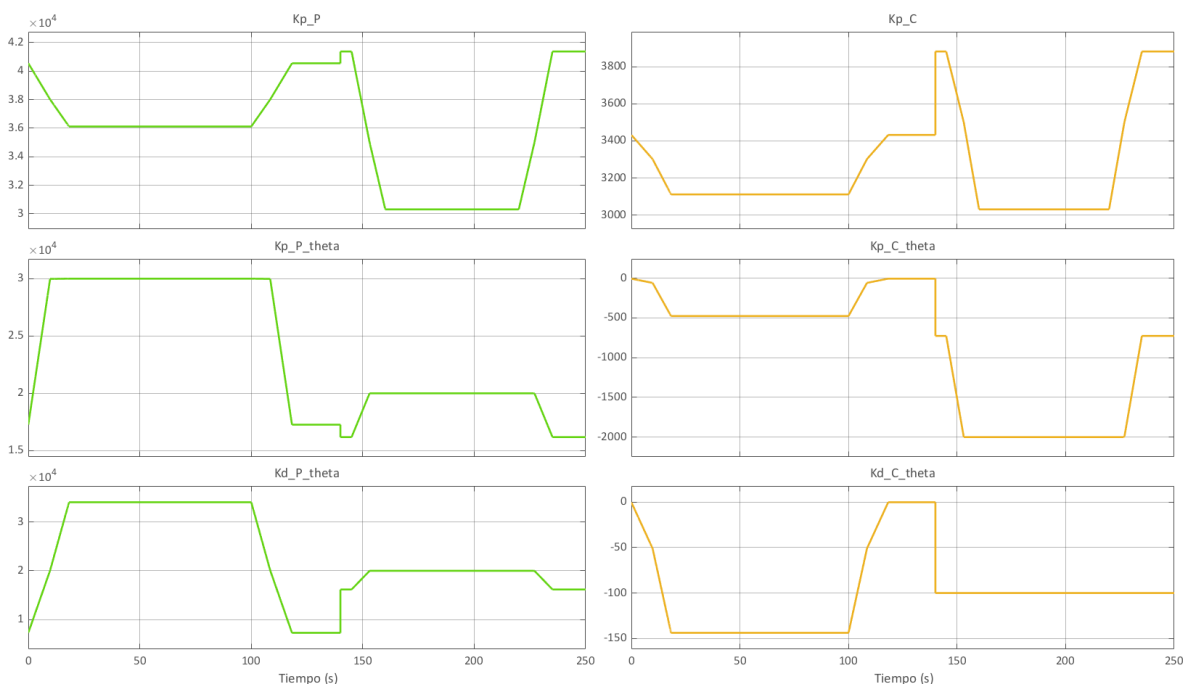


## 4.7 COMPARATIVA DE LOS CONTROLES Y CONCLUSIONES

Una vez definido y sintonizado el control anti-balanceo, se comprueba su funcionamiento, con el mismo ensayo definido anteriormente, y, comparándolo con el control con un solo regulador.

Se realiza primero una comprobación igual a la que aparece en la Figura 53, para validar que los cambios en las ganancias se realizan de forma coherente con los cambios en las variables de planificación. En este caso, al existir tres ganancias para cada lazo de control relativo a cada posición, existen 6 ganancias en total, dos más que en el anterior control. El cambio de estas ganancias se muestra en la Figura 61. Los cambios en las variables de planificación son iguales a las mostradas en la Figura 54. Se observa como estas ganancias varían de forma coherente ante los cambios en  $M_c$  y  $L$ .

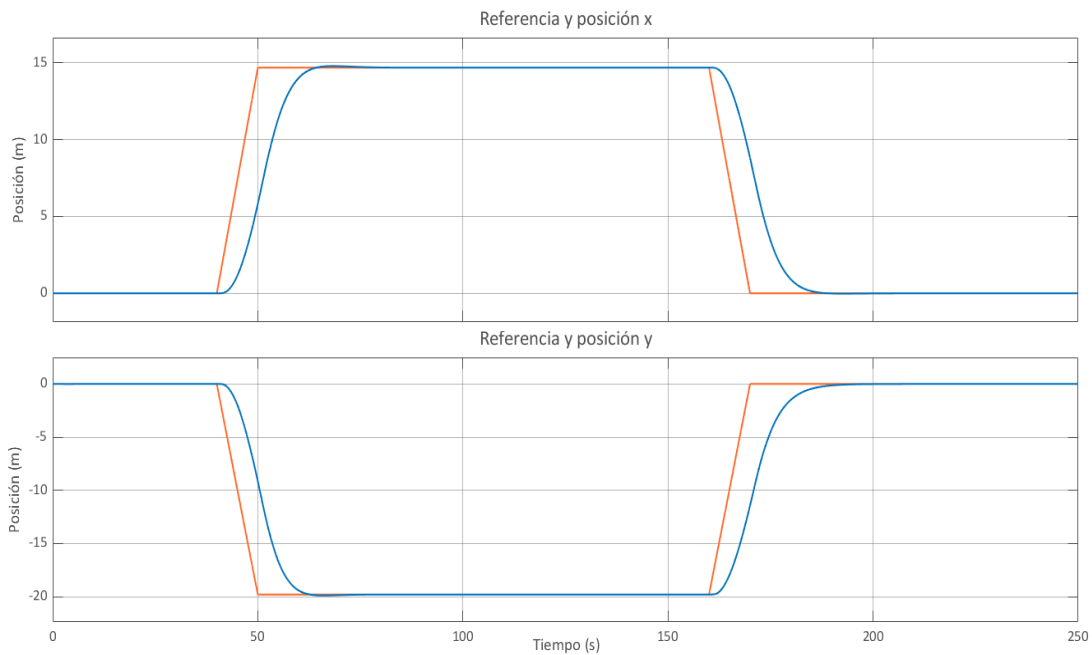
**Figura 61 Variación de las ganancias a lo largo de la operación, control anti-balanceo**



Comprobamos ahora la respuesta de este sistema anti-balanceo representando la respuesta de las posiciones del spreader ante un seguimiento de referencias. Para este ensayo se establecen las mismas condiciones que las empleadas para la obtención de la Figura 55, de forma que se pueda plantear una comparativa de las respuestas ante las mismas condiciones. En este punto cabe destacar que se representan las posiciones del spreader puesto que es lo que se medía en el anterior control. Sin embargo, en este control se miden las posiciones del carro, siendo estas posiciones iguales cuando la oscilación es pequeña.

Se observa en la Figura 62 la respuesta de las posiciones del spreader ante los cambios en las referencias. Las conclusiones que se extraen de su comparación con el control PID son claras: El seguimiento sigue realizándose de manera correcta sin sobreoscilaciones, y con error de posición nulo. Pero, además, al tener otro controlador que permite reducir el efecto de las oscilaciones, no se requieren especificaciones en el tiempo de establecimiento tan conservadoras como en el anterior control, siendo visible ahora, un tiempo de establecimiento notablemente menor en el movimiento longitudinal de la grúa.

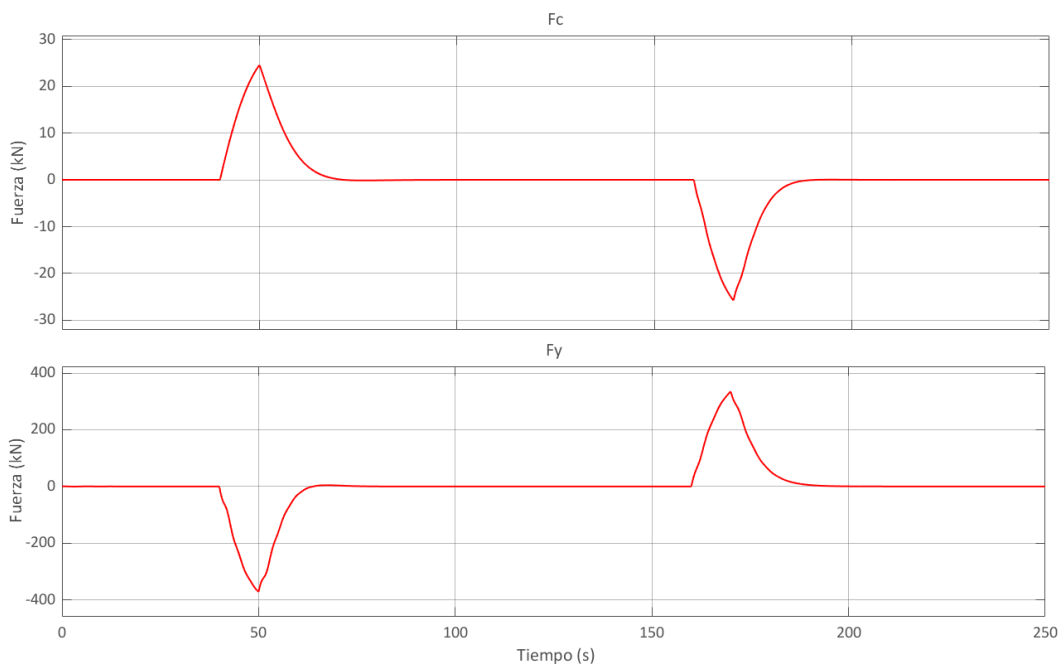
**Figura 62 Seguimiento de referencias con planificación de ganancias y control anti-balanceo**



Se ha solucionado uno de los problemas que presentaba el control con un único PID, la lentitud del movimiento del pórtico, estableciéndose ahora unas velocidades prácticamente iguales para ambos movimientos y más cercanas a los valores máximos. Este ensayo se ha repetido para varias combinaciones de parámetros de masa de contenedor y longitud de cables en la traslación horizontal, y en todos ellos las conclusiones son las mismas.

Tras revisar que el seguimiento de las referencias mejora, debe comprobarse igual que en el control PID, que las potencias no superan la capacidad de los motores y las fuerzas son adecuadas. Se muestra en la Figura 63 las acciones de control para el caso más desfavorable, el mismo caso con el que se obtuvieron las figuras 50 y 51.

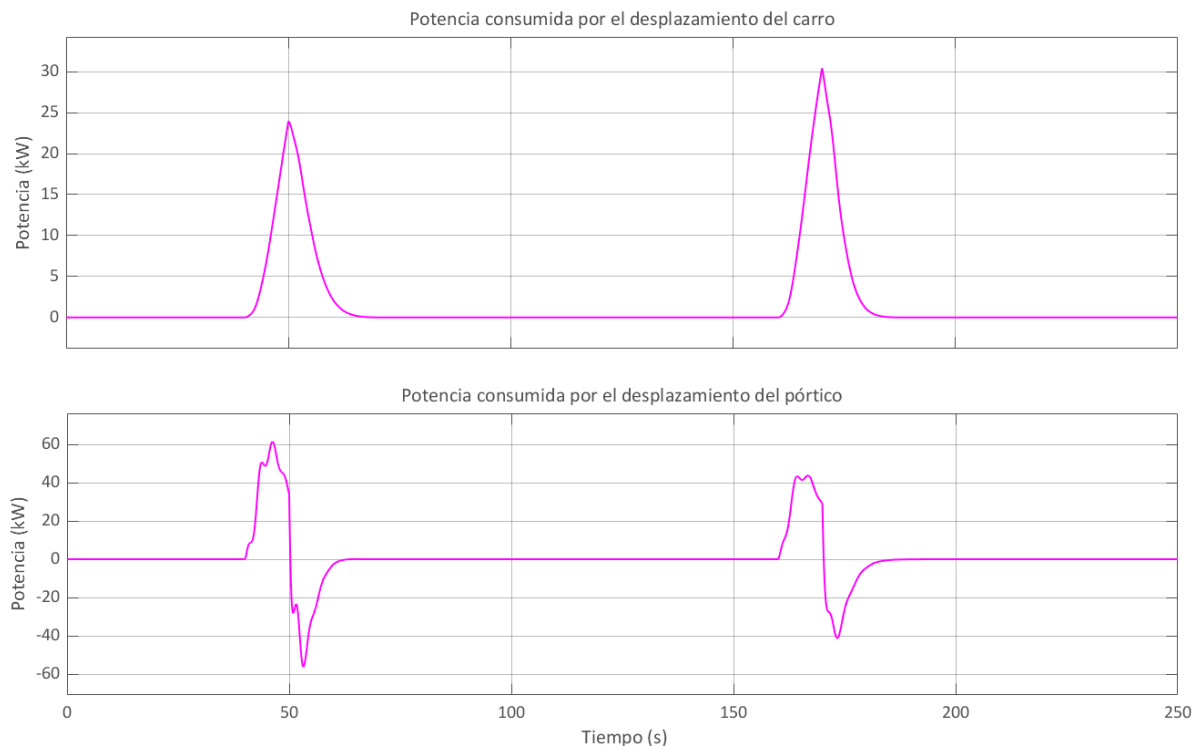
**Figura 63 Acciones de control con planificación de ganancias y control anti-balanceo**



De estos resultados se observa como la acción de control del carro se mantiene prácticamente igual, siendo solo un poco inferior para el caso del control anti-balanceo, mientras que la acción de control que controla el movimiento del carro aumenta notablemente. Esto tiene sentido puesto que ahora la respuesta de este movimiento es más rápida. Además, también se observa una mayor oscilación en la señal  $F_y$ , debido a la contribución del regulador PD que ajusta esta acción de control para evitar las oscilaciones.

Para asegurar que las potencias siguen manteniéndose dentro de los límites admisibles, se miden y representan en la Figura 64 bajo las mismas condiciones que las fuerzas.

**Figura 64 Potencias con planificación de ganancias y control anti-balanceo**

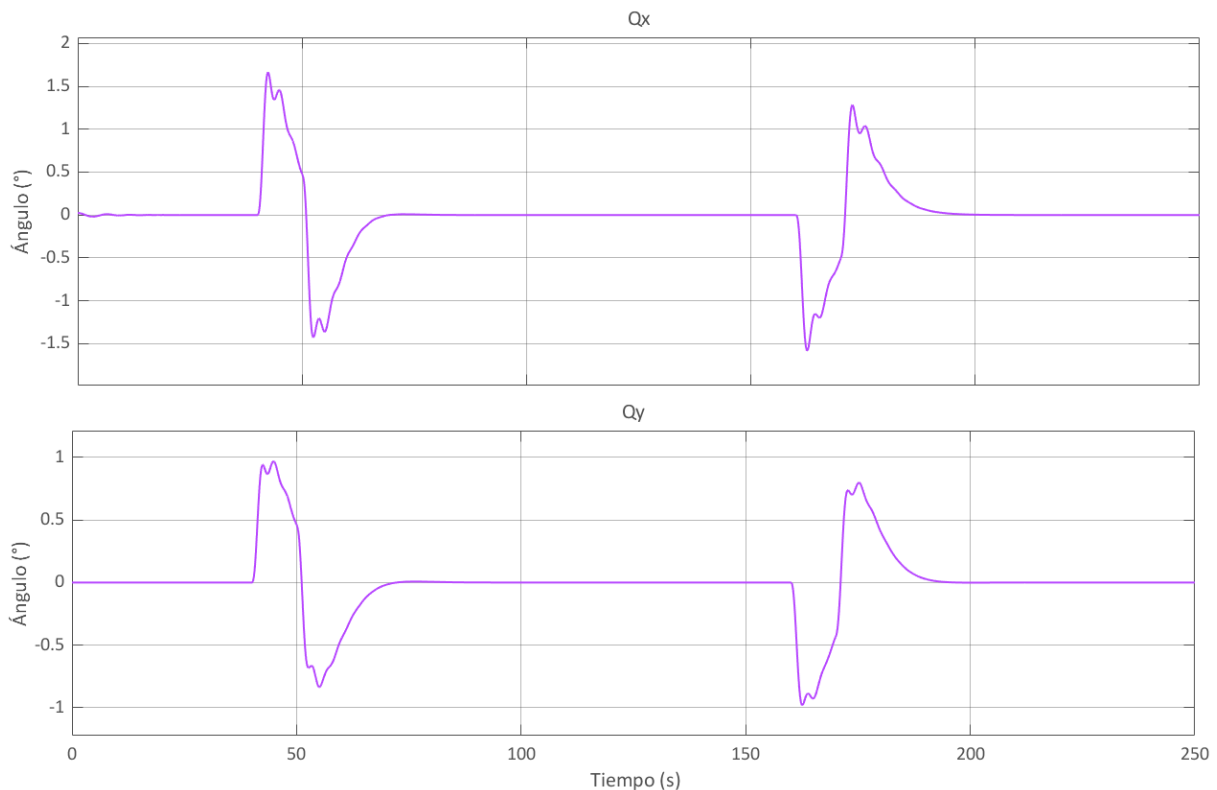


Comparando estas potencias con las obtenidas en la Figura 58 puede verse como la potencia consumida por el carro ya no se encuentra tan cerca del límite de los 36 kW, mientras que la potencia consumida por el movimiento del pórtico ha aumentado significativamente, por el mismo motivo que la acción de control asociada. No obstante, sigue dentro de los límites del motor. Al igual que ocurría con la acción de control, puede verse esa oscilación en la potencia asociada al movimiento longitudinal.

Hasta ahora, se ha comprobado que la respuesta ante las referencias ha mejorado en el caso del movimiento del pórtico y se ha mantenido prácticamente igual en el movimiento del carro, siendo esto la causa del aumento de potencia consumida en el movimiento del pórtico, y consiguiendo una reducción en la potencia consumida por el movimiento del carro sin afectar notablemente a la respuesta ante referencias.

Queda, como última comprobación, observar que ocurre con los ángulos de inclinación  $Q_x$  y  $Q_y$ , observando su respuesta ante el mismo ensayo sobre el cual se extrajo la información de la Figura 59, para, de esta forma, comparar y validar el control anti-balanceo. La respuesta de los ángulos de inclinación ante este ensayo se muestra en la Figura 65.

**Figura 65 Ángulos de oscilación del contenedor con planificación de ganancias y control anti-balanceo**



Comparando esos ángulos con los que se presentaban en el control PID con un solo regulador queda demostrado que se mejora de forma muy significativa la oscilación del contenedor, tanto en su movimiento longitudinal como transversal. Es en el movimiento del pórtico donde esto se hace más notable, consiguiendo una reducción desde los casi 3 grados que se alcanzaban hasta poco más de 1.5 grados. Además, es importante destacar no solo la limitación de la amplitud de las oscilaciones, sino también su reducción en el tiempo que estas oscilaciones duran, observando como en el control anti-balanceo, solo se presentan dos grandes picos en el momento del desplazamiento inicial. Como conclusión adicional, se destaca que, de estos dos picos generados el segundo es el más crítico, puesto que el primero es el que aparece cuando la grúa se mueve pero el contenedor se mantiene en su posición por inercia, mientras que el segundo pico es el que se da cuando el contenedor se mueve hacia la posición del carro, y, también por inercia, rebasa dicha posición. El segundo caso es más peligroso puesto que en el primero el contenedor no se mueve de su posición, mientras que en el segundo el contenedor sobrepasa la posición reservada para él. En la Figura 65 se observa como el segundo pico siempre es menor que el primero, cosa que no siempre ocurría con el control con un solo regulador. Comentar por último que estos ángulos se han medido para otra serie de ensayos, comprobando que siempre presentan un mejor comportamiento que con el anterior control.

Como resumen final, el control anti-balanceo se presenta como una mejor alternativa al control con un solo regulador y una sola medida de la posición. Además, es un control más realista, teniendo en cuenta la naturaleza de sensores y medidas disponibles en una grúa RTG.

# CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL

## 5.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se han diseñado satisfactoriamente una serie de sistemas de control, siendo el más efectivo a efectos de reducción de las oscilaciones del spreader y bajo error de posición el sistema con doble lazo controlando por una parte la posición del carro y por otra el ángulo de oscilación de los cables, donde las ganancias de los controladores se calculan mediante algoritmos de planificación de ganancias. Sin embargo, este sistema de control se ha incorporado dentro del propio modelo simulado de la grúa para observar su funcionamiento y poder validarlo, siendo esto poco realista, puesto que en la realidad el sistema de la grúa estará controlado mediante un autómata programable. Por este motivo, en este capítulo se presenta la implementación del sistema de control diseñado en un PLC, el cual se comunicará en tiempo real con el modelo simulado recibiendo las salidas necesarias para el control y enviando las acciones de control correspondientes.

## 5.2 ESTRUCTURA

La estructura de este capítulo se centra en la sucesión lineal de las tareas necesarias para poner en funcionamiento el control dentro del autómata programable. De esta forma, el primer subapartado se centrará en el entorno de trabajo sobre el cual se programará el PLC, así como en las características básicas de la comunicación y el tratamiento de los datos. Una vez se tengan claro los tipos de datos que se transmiten y mediante que formato se programará el PLC, el segundo subapartado mostrará toda la programación del mismo, con todos los programas necesarios para su correcto funcionamiento. Tras la programación del PLC, el último apartado se reserva para comprobar la validez de la implementación del control en el autómata comparando las respuestas que proporciona en el sistema de la grúa simulada con respecto al control embebido en Simulink.

## 5.3 ENTORNO DE TRABAJO, COMUNICACIÓN Y DATOS

Aunque en el siguiente capítulo se tratara extensamente la cuestión de la forma de comunicación del PLC con el sistema simulado de la grúa RTG, en este apartado se mostrará sin entrar en detalles las variables que entran y las que salen del PLC, las cuales son:

Entradas al PLC:

- Posición x del carro
- Posición y del carro
- Ángulo en el plano YZ de los cables
- Ángulo en el plano XY de los cables

Además de estas entradas, se enviará una señal booleana para comprobar que se ha realizado de manera correcta la conexión entre PLC y sistema simulado y mediante la cual se iniciarán los programas del PLC.

Salidas del PLC:

- Acción de control del movimiento del carro (fuerza)
- Acción de control del movimiento de las ruedas (fuerza)
- Acción sobre el elevador (longitud de los cables)
- Acción de enganche/desenganche del contenedor al spreader

Se debe tener en cuenta que a pesar de que las acciones de control que se aplican son fuerzas, se trata de una simplificación, pues, en realidad, si este PLC se configurase para trabajar con una grúa real, las salidas deberían ser tensiones, que, aplicadas a los motores adecuados, según su dinámica concreta, aplicarían la fuerza deseada sobre el carro o los bogies. Además, como se comentó en el capítulo dedicado a la creación del modelo simulado en Simulink, el modelo no contempla la dinámica del motor del elevador, por lo que la señal de la acción sobre el elevador es directamente la longitud de los cables.

En cuanto al PLC y al entorno empleado para programarlo, se trata de Codesys (CODESYS Group, 2024), el cual es un entorno dedicado a la programación de controladores mediante el estándar industrial IEC 61131-3. Este estándar permite la programación de autómatas en seis lenguajes de programación distintos, los cuales son: IL (Lista de instrucciones), ST (Texto estructurado), LD (Diagrama Ladder), FBC (diagrama de bloques de función), SFC (Bloques de función secuenciales) y CFC (*Continuous Function Chart*).

En el caso de la programación de este PLC se empleará lenguaje en forma de texto estructurado, puesto que es el único que nos permitirá introducir la forma de los PIDs diseñados, además de ser el más fácil para codificar las condiciones y dinámicas del algoritmo de planificación de ganancias.

Antes de entrar en la programación del PLC se tratará la naturaleza de los datos. Al ser necesario transferirlos por medio de un protocolo de comunicaciones industriales, el cual, como se comentará más adelante, es el protocolo Modbus, es fundamental adaptar los datos recibidos y enviados por el PLC para que mantengan la forma establecida por el protocolo. En este caso, todos los datos, excluyendo la salida del PLC relativa a la acción de enganche/desenganche del contenedor, son señales analógicas, que pueden tomar cualquier valor. Sin embargo, el protocolo Modbus solo puede enviar y recibir datos enteros de 16 bits, lo que quiere decir que puede guardar información de 65535 estados distintos. Se muestran a continuación las operaciones que deben realizarse sobre los datos de entrada y salida para obtener un dato entero de 16 bits justificando estas decisiones.

Para empezar, para todos los datos de entrada al PLC, tanto las posiciones como los ángulos, la operación que se realiza sobre ellos es la siguiente:

$$\text{Dato entrada a PLC} = \text{Entero Redondeado}(\text{dato analógico} * 100) + 32768$$

De esta forma, el PLC podrá recibir datos positivos y negativos, estableciendo la mitad del rango de los 16 bits (32768) como cero. Además, al multiplicar el dato analógico por cien se alcanza una precisión del segundo decimal en las posiciones, es decir, puesto que estas posiciones son metros, la precisión es de un centímetro. En cuanto al rango en que pueden variar esas posiciones es desde -327,68 metros hasta 327,68 metros, lo cual es perfectamente aceptable tanto para el caso simulado como para una grúa RTG real. Si observamos el rango y la precisión de los ángulos, estos tienen, al igual que con la distancia, precisión hasta el segundo decimal y un rango que cubre todo el giro completo del contenedor en cualquier posición. Si se hubiera escogido multiplicar el dato por mil en vez de por cien, se habría obtenido una precisión aún mayor, hasta el tercer decimal, sin embargo, los rangos de las

distancias disminuirían hasta los 33 metros, y los rangos de los ángulos no tendrían en cuenta ángulos mayores de 33 grados. Por este motivo se escoge este equilibrio entre precisión y rango.

En cuanto a las salidas del PLC, aquellas correspondientes con las fuerzas aplicadas, se calculan de la siguiente forma:

$$\text{Dato salida (Señal de fuerzas)} = \text{Entero Redondeado}(\text{dato analógico}/10) + 32768$$

En este cálculo, el dato se divide entre 10 puesto que la magnitud en la que se miden y aplican estas fuerzas son Newtons. Dado que el movimiento del carro y el pórtico requiere de más de unas decenas de kN, es conveniente establecer la precisión de los datos de estas fuerzas en 10 N, puesto que una diferencia de un solo newton es completamente inapreciable en las salidas o el comportamiento del sistema. De esta forma, tanto para la fuerza aplicada al carro como la aplicada a las ruedas del pórtico el rango de fuerzas disponibles es desde -327 kN hasta 327 kN, un rango adecuado teniendo en cuenta el comportamiento del sistema, en el cual no se requieren picos mayores de estos valores.

Por otra parte, el dato de la longitud de los cables, al ser un dato medido en metros, cuyo rango es desde un metro hasta aproximadamente treinta, el cálculo para formar el dato digital de salida es:

$$\text{Dato salida (Longitud de cables)} = \text{Entero Redondeado}(\text{dato analógico} * 1000)$$

Se puede observar cómo, en este caso, al dato redondeado no se le suma el valor del punto medio del rango disponible con los 16 bits, esto se debe a que el valor de la longitud de los cables solo puede ser positivo. En este caso se tiene una precisión de un milímetro, y un rango comprendido entre los 0 y los 65,535 metros, longitud que sobrepasa sobradamente el límite en que los cables tocan el suelo.

Por último, el dato del enganche y desenganche del contenedor al spreader es trivial por ser un dato booleano, el cual emplea únicamente un bit para codificar su estado.

Cabe mencionar como aclaración que, al igual que se hacen estas operaciones en el emisor de los datos, el receptor debe realizar las operaciones inversas para decodificar la verdadera magnitud de los datos que reciba.

## 5.4 PROGRAMACIÓN DEL PLC

Tras ver de manera general los tipos de datos empleados y su manejo dentro de la comunicación entre el PLC y el sistema simulado se procede en este subapartado a mostrar de manera general los distintos programas que se ejecutan en paralelo para el control embebido en el PLC junto con su explicación y justificación. El código completo se adjunta en el documento ANEXO.

### 5.4.1 Programas de PIDs

Los primeros programas que se desarrollan son los relativos a la propia implementación de los PIDs, en estos, los pasos fundamentales que se tienen que seguir en la ejecución son:

1. Lectura de las salidas (Posición y ángulo de inclinación)
2. Cálculo de los errores
3. Cálculo de la acción de control mediante el algoritmo de los PIDs
4. Saturación de la acción de control
5. Actualización de las variables empleadas en los algoritmos de los PIDs
6. Escritura de la acción de control en las salidas correspondientes

Estos son los pasos fundamentales que se llevan a cabo en los dos programas dedicados al cálculo de las acciones de control mediante el control de doble lazo PID. De los pasos mencionados anteriormente solo se mostrará de forma más extensa el relativo al cálculo de la acción de control mediante los algoritmos de los PID. Estos algoritmos se implementan de forma que las ganancias calculadas en continuo sirvan y no sea necesario calcular un nuevo set de ganancias discretas o transformar las ya existentes. El algoritmo se implementa en forma paralela siguiendo las siguientes expresiones generales (Simarro Fernández).

Lectura de los datos y cálculo del error

$$y_k = \text{Lectura dato}$$

$$e_k = \text{referencia} - y_k$$

Cálculo por separado de la acción proporcional integral y derivativa

$$P_k = K_p \cdot e_k$$

$$I_k = I_{k_1} + \left( K_p \cdot \frac{T}{T_i} \right) \cdot e_{k_1}$$

$$D_k = \left( K_p \cdot \frac{T_d}{T} \right) \cdot (e_k - e_{k_1})$$

Cálculo de la acción de control

$$u_k = P_k + I_k + D_k$$

Al aplicar este algoritmo a los PID's empleados para el control de las posiciones del contenedor, se prescinde de la acción integral, puesto que los reguladores empleados son P y PD, por este mismo motivo, también se hace innecesario contar con algún tipo de mecanismo antiWindup. También se debe comentar que las ganancias obtenidas para los reguladores, en el apartado en el cual se explicaba el control por planificación de ganancias son  $K_p$  y  $K_d$ , por lo que, se debe modificar de la expresión de la parte derivativa de la acción de control el término  $T_d$  por  $K_d/K_p$ .

Como el sistema de control planteado consta de dos lazos en los cuales se mide el error de posición y el ángulo de inclinación, este esquema de ecuaciones se empleará primero para el cálculo de la acción proporcional del regulador P que controla la posición, y después para el cálculo de las acciones proporcional y derivativa del regulador PD que limita las oscilaciones del contenedor. Se muestra en el Código 4 un fragmento del código empleado para el control de la posición del carro, siendo el código utilizado para controlar la posición del pórtico completamente homólogo. Puede observarse en este código el cálculo de las diferentes acciones proporcionales y derivativas de los dos lazos de control y al final la suma en una única acción de control, que es la fuerza aplicada al carro.



#### Código 4 Algoritmo de control de la posición del carro mediante el doble lazo PID

```
//Lectura de las salidas
yC := (PxC-32768.0)/100.0;
yC_theta := (Qy-32768.0)/100.0;

//Calculo del error
eC := RefC - yC;

//===== Cálculo de la acción de control (Fc) =====//

// PID posición
P_C := Kp_C*eC;

// PID ángulo
P_C_theta := Kp_C_theta*yC_theta;
D_C_theta := (Kp_C_theta*((Kd_C_Theta/Kp_C_theta)/T))*(yC_theta-yC_theta1);

// Acción de control
uC := P_C+P_C_theta+D_C_theta;
```

En este caso de control concreto, las acciones de control no están limitadas, puesto que la limitación de la grúa pórtico es la potencia que sus motores pueden proporcionar. Por este motivo, en estos códigos se establece un gran margen en la saturación de las salidas, que corresponde más con la salida del rango disponible con los bits empleados que con una restricción real de la capacidad de aplicar esa fuerza por parte de la grúa. Sin embargo, para comprobar que el sistema es correcto, en el último capítulo deberá comprobarse que en ninguna circunstancia se supera la potencia máxima de ningún motor.

#### 5.4.2 Programa de planificación de ganancias

Se ha visto como se configuran los dos programas encargados del control de la posición y la oscilación del contenedor en sus dos direcciones, sin embargo, para aplicar el control con el sistema propuesto de planificación de ganancias se requiere que esos valores representados como:  $Kp\_C$ ,  $Kp\_C\_theta$ ,  $Kd\_C\_theta$ ,  $Kp\_P$ ,  $Kp\_P\_theta$  y  $Kd\_P\_theta$  varíen en función de las variables de planificación. Para ello se genera un programa aparte, funcionando en paralelo, que compruebe en todo momento los valores de  $M_c$  y  $L$  y según esta información genere el set correspondiente de ganancias que se emplearán en los programas de los PID.

La estructura del programa para la selección de cada una de las ganancias es la siguiente:

Primero busca el rango en el que se sitúa la masa y genera tres ganancias, las cuales son directamente las ganancias asociadas a ese rango de masas del contenedor, una por cada longitud seleccionada como punto de operación. Una vez seleccionadas estas ganancias se evalúa el parámetro de la longitud de los cables. La evaluación de este parámetro consiste en dos pasos: primero, se localiza dentro de que rango se encuentra este parámetro, y el segundo paso es realizar una interpolación lineal entre dos de las tres ganancias intermedias calculadas con el parámetro  $M_c$ . En caso de que la longitud de los cables se encuentre por debajo o por encima de los valores límites de los puntos de operación, se escogerá directamente la ganancia intermedia asociada a ese caso extremo sin realizar ningún tipo de interpolación.

El fragmento de código mostrado en el Código 5 muestra la programación de los pasos comentados en el párrafo anterior para el caso concreto de la ganancia Kp\_P, ganancia asociada al regulador P de la posición del pórtico.

**Código 5 Algoritmo de planificación de ganancias para el cálculo de Kp\_P**

```
// ===== Control Pórtico ===== //
// === Ganancia Kp === //
IF (Mc<=Mc_vec[1]) THEN

    G1_Kp_P := PG_Kp_P[4, 1];
    G2_Kp_P := PG_Kp_P[4, 2];
    G3_Kp_P := PG_Kp_P[4, 3];

ELSIF (Mc>Mc_vec[1] AND Mc<=Mc_vec[2]) THEN

    G1_Kp_P := PG_Kp_P[3, 1];
    G2_Kp_P := PG_Kp_P[3, 2];
    G3_Kp_P := PG_Kp_P[3, 3];

ELSIF (Mc>Mc_vec[2] AND Mc<Mc_vec[3]) THEN

    G1_Kp_P := PG_Kp_P[2, 1];
    G2_Kp_P := PG_Kp_P[2, 2];
    G3_Kp_P := PG_Kp_P[2, 3];

ELSIF (Mc>=Mc_vec[3]) THEN

    G1_Kp_P := PG_Kp_P[1, 1];
    G2_Kp_P := PG_Kp_P[1, 2];
    G3_Kp_P := PG_Kp_P[1, 3];

END_IF

IF (L_real<=L_vec[1]) THEN

    Kp_P := G1_Kp_P;

ELSIF (L_real>L_vec[1] AND L_real<=L_vec[2]) THEN

    Kp_P := ((L_vec[2] - L_real) * G1_Kp_P + (L_real - L_vec[1]) * G2_Kp_P)/(L_vec[2] - L_vec[1]);

ELSIF (L_real>L_vec[2] AND L_real<=L_vec[3]) THEN

    Kp_P := ((L_vec[3] - L_real) * G2_Kp_P + (L_real - L_vec[2]) * G3_Kp_P)/(L_vec[3] - L_vec[2]);

ELSIF (L_real>L_vec[3]) THEN

    Kp_P := G3_Kp_P;

END_IF
```

Para el resto de las ganancias el código es el mismo cambiando solo las variables empleadas. Al ejecutarse este código en paralelo con la misma periodicidad que el código de los reguladores se consigue que en cada momento se apliquen las ganancias adecuadas a la situación concreta de la grúa RTG.

### 5.4.3 Programa de las referencias

El último código presentado realiza la función de generación de las referencias. En este programa se generan unas referencias correspondientes al ensayo planteado para la validación del sistema de doble lazo con planificación de ganancias implementado directamente en Simulink. De esta forma se podrán comparar directamente las salidas y el comportamiento de la grúa con el control implementado en el PLC y el implementado en Simulink, siendo que para poder validar el control desarrollado en el PLC estos dos ensayos deben ser prácticamente idénticos.

Todos los cambios de referencia se realizan mediante instrucciones condicionales tipo if, mediante las cuales aplicar una u otra referencia en función del tiempo. En el Código 6 se muestra una parte del código, en el cual puede verse el ejemplo de los cambios de referencia en las posiciones transversal y longitudinal del contenedor.

#### Código 6 Programa para el cambio de referencias, cambio de las referencias de las posiciones

```
//==== REFERENCIA CARRO y PÓRTICO ====//
IF ((CLK/100.0)<50.0-Ttrans) THEN

RefC := Xini;
RefP := Yini;

ELSIF ((CLK/100.0)>50.0-Ttrans AND (CLK/100.0)<50.0) THEN

RefC := ((Xfin-Xini)/Ttrans)*((CLK/100.0)-(50-Ttrans));
RefP := ((Yfin-Yini)/Ttrans)*((CLK/100.0)-(50-Ttrans));

ELSIF ((CLK/100.0)>50 AND (CLK/100.0)<170-Ttrans) THEN

RefC := Xfin;
RefP := Yfin;

ELSIF ((CLK/100.0)>(170-Ttrans) AND (CLK/100.0)<170) THEN

RefC := Xfin+((Xini-Xfin)/Ttrans)*((CLK/100.0)-(170-Ttrans));
RefP := Yfin+((Yini-Yfin)/Ttrans)*((CLK/100.0)-(170-Ttrans));

ELSIF ((CLK/100.0)>170.0) THEN

RefC := Xini;
RefP := Yini;

END_IF
```

Se hace visible en este código como, además de cambiar las referencias en función de la señal de tiempo CLK, esta referencia no se aplica directamente en escalón, sino que hay un cierto tiempo de transición en el cual la referencia varía en forma de rampa cambiando del valor inicial al final. Esto sirve para evitar picos bruscos instantáneos en la potencia consumida por los motores.

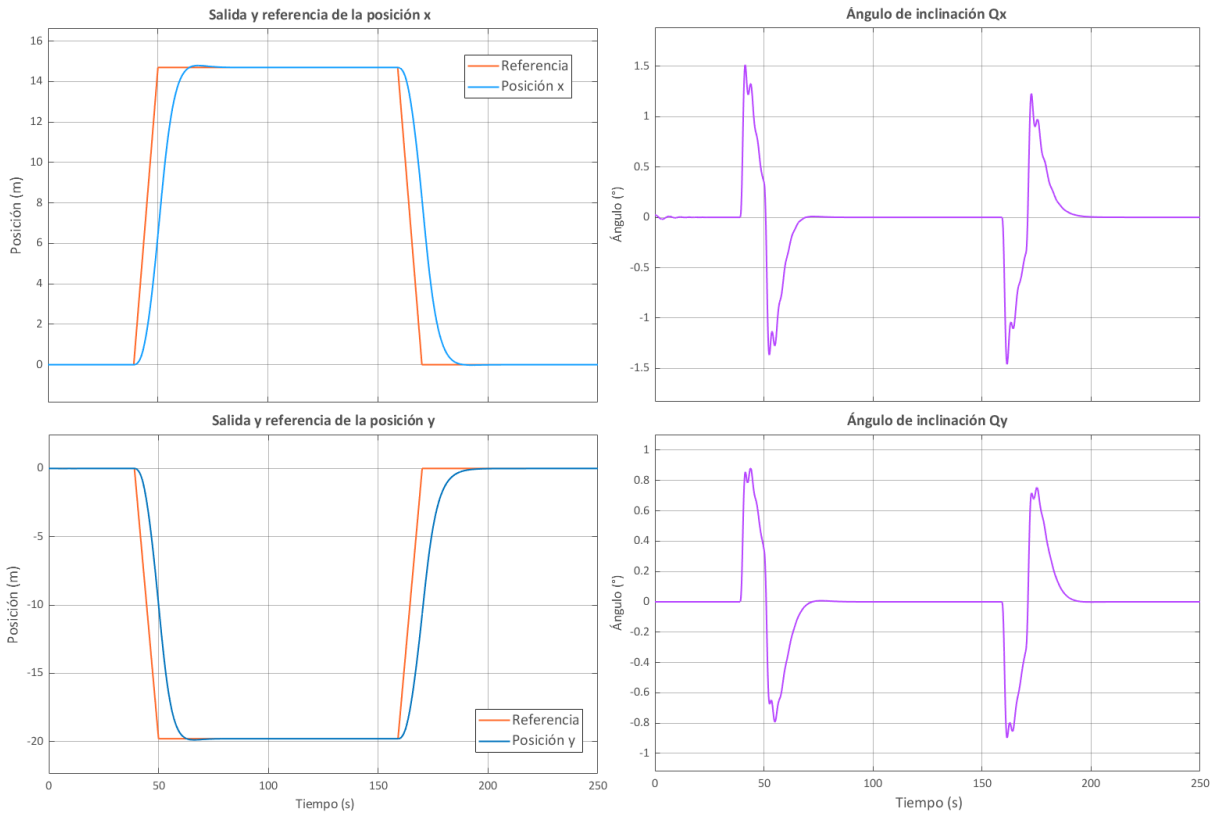
Con este último programa quedan definidas todas las rutinas que se ejecutan de forma simultánea dentro del autómata programable para lograr el control de la grúa simulada.

## 5.5 VALIDACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL

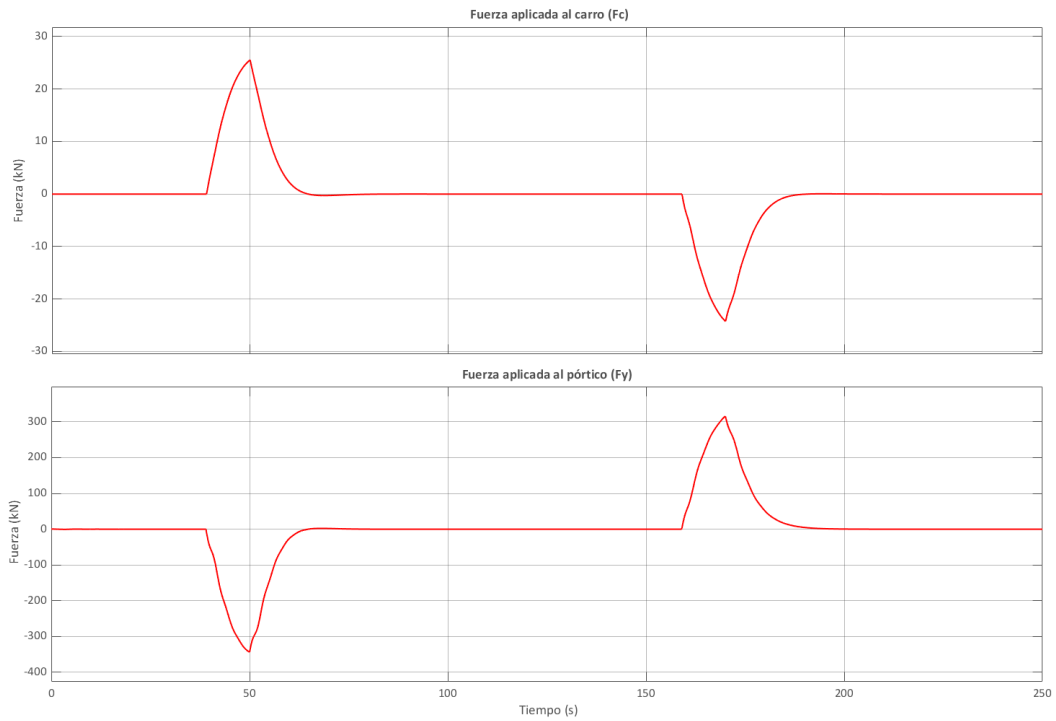
Tras desarrollar todo el código que permite el control de la grúa desde un PLC, queda ahora comprobar que este autómata programable controla el sistema igual que el control directamente aplicado sobre Simulink, pudiendo validar así su correcto funcionamiento. Para ello se lleva a cabo el ensayo definido en el capítulo 4 tanto para el control implementado en el PLC como para el control en doble lazo con planificación de ganancias implementado directamente en Simulink.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación, se comparan tanto las salidas como las fuerzas aplicadas.

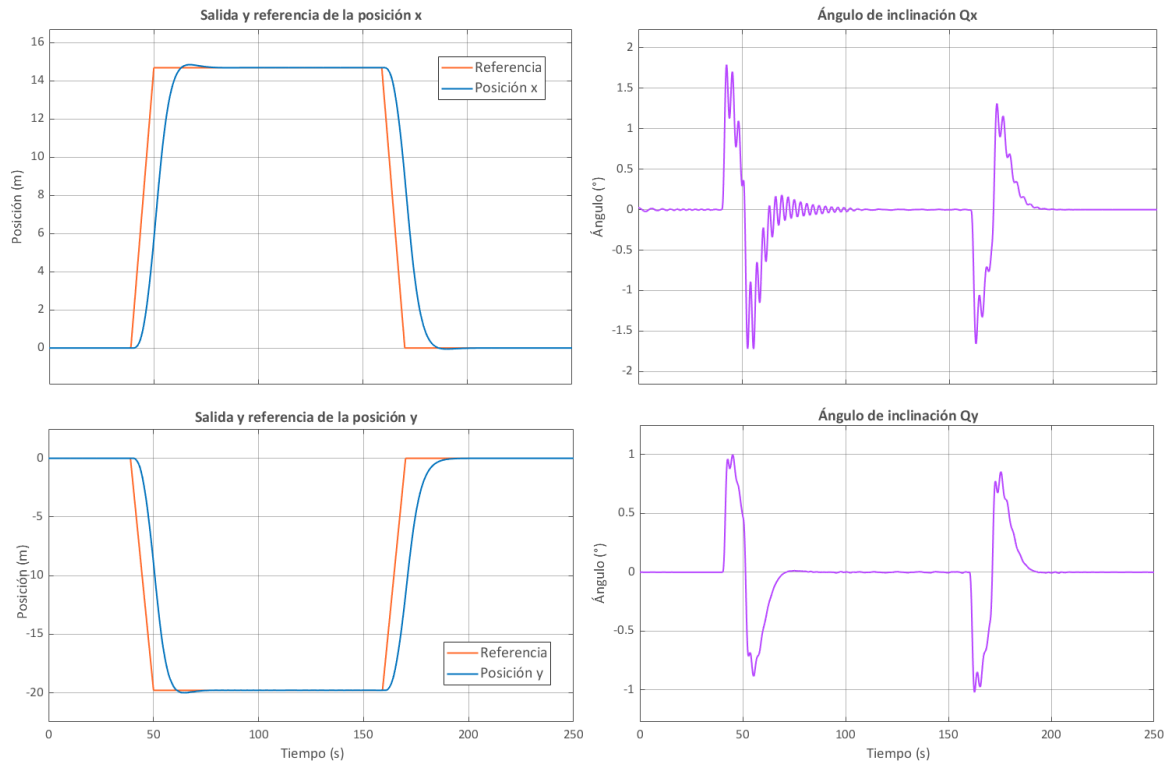
**Figura 66 Ensayo de control de la grúa, salidas, control dentro de Simulink**



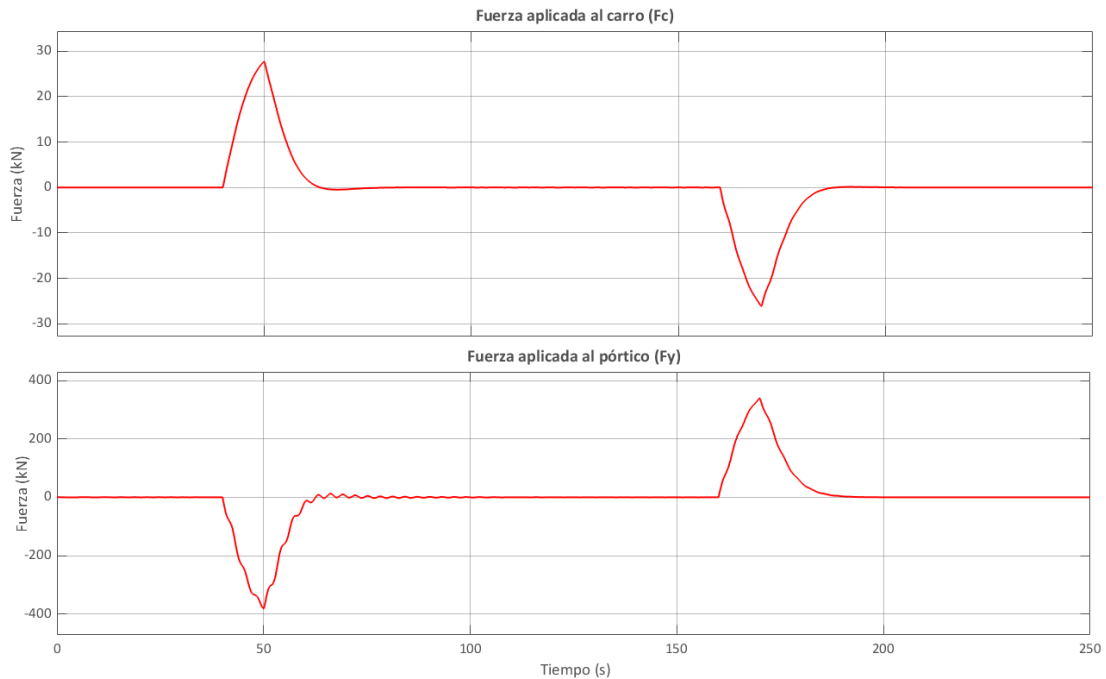
**Figura 67 Ensayo de control de la grúa, fuerzas, control dentro de Simulink**



**Figura 68 Ensayo de control de la grúa, salidas, control desde PLC**



**Figura 69 Ensayo de control de la grúa, fuerzas, control desde el PLC**



Se observa en las figuras 44 a 47 las salidas y acciones de control que se presentan al aplicar el control sobre el sistema de la grúa simulada, las figuras 44 y 45 muestran los resultados de aplicar el control dentro de Simulink y las figuras 46 y 47, los resultados al aplicar este control desde un PLC conectado mediante Modbus al sistema de la grúa simulada. Las respuestas son muy parecidas, sin embargo, se hace notable una mayor oscilación y mayores valores en las amplitudes de los ángulos. Esto puede responder a varias causas. Se debe considerar que el control planteado en el PLC requiere de un

periodo de muestreo, cuya selección se justifica en el siguiente capítulo. Por tanto, los controladores implementados en el PLC no son capaces de proporcionar una acción de control continua en todo momento, de forma que, poco a poco, en cada periodo de muestreo deben compensar esas pequeñas oscilaciones en los ángulos hasta reducirlas completamente. Además, como se ha comentado en el apartado de la implementación de la planificación de ganancias en Simulink, estas tienen una interpolación completa con las dos variables de planificación, mientras que en la implementación en el PLC las ganancias cambian de forma discreta con los cambios en  $M_c$ . Por último, debe considerarse también que, debido a la resolución de 16 bits disponible, no se permite una continuidad ideal en los valores de las acciones de control, lo que también influye en las posibles diferencias entre el control ideal y el implementado en el PLC.

Las anteriores figuras sirven para mostrar de forma general las diferencias entre los controles en Simulink y en el PLC. Sin embargo, se realizan distintos ensayos con el control implementado en el PLC, cambiando la masa y la altura de elevación a la que se produce el movimiento horizontal. En todos los ensayos se presentan oscilaciones reducidas, similares a las de la Figura 68, tiempos de establecimiento iguales a los que aparecían con el control en Simulink y acciones de control y potencias adecuadas. Con todo lo comentado se concluye que, aun no siendo un control igual al ideal empleado en el modelo Simulink, teniendo en cuenta las limitaciones de resolución y discretización del tiempo, es un control adecuado.

# CAPÍTULO 6: COMUNICACIÓN ENTRE DISPOSITIVOS

## 6.1 INTRODUCCIÓN

Se describe en este capítulo la casuística relacionada con las conexiones industriales empleadas para la conexión entre el PLC y la grúa. Se expondrá tanto la comunicación empleada entre el PLC virtual con el modelo simulado de la grúa, como la que se debería implementar en la realidad entre uno o varios autómatas programables dentro de la grúa RTG real.

## 6.2 ESTRUCTURA

Este capítulo consta de tres subapartados. En el primero se describirá de forma general el protocolo de comunicaciones industriales empleado y se justificará su uso. En el segundo subapartado se expone la forma de comunicación entre la grúa simulada y el PLC virtual configurado mediante CODESYS. Y, por último, en el tercer subapartado se comentarán las diferencias entre la comunicación implementada para el modelo de la grúa simulada y la comunicación real que debería establecerse si quisiese realizarse sobre la grúa RTG real.

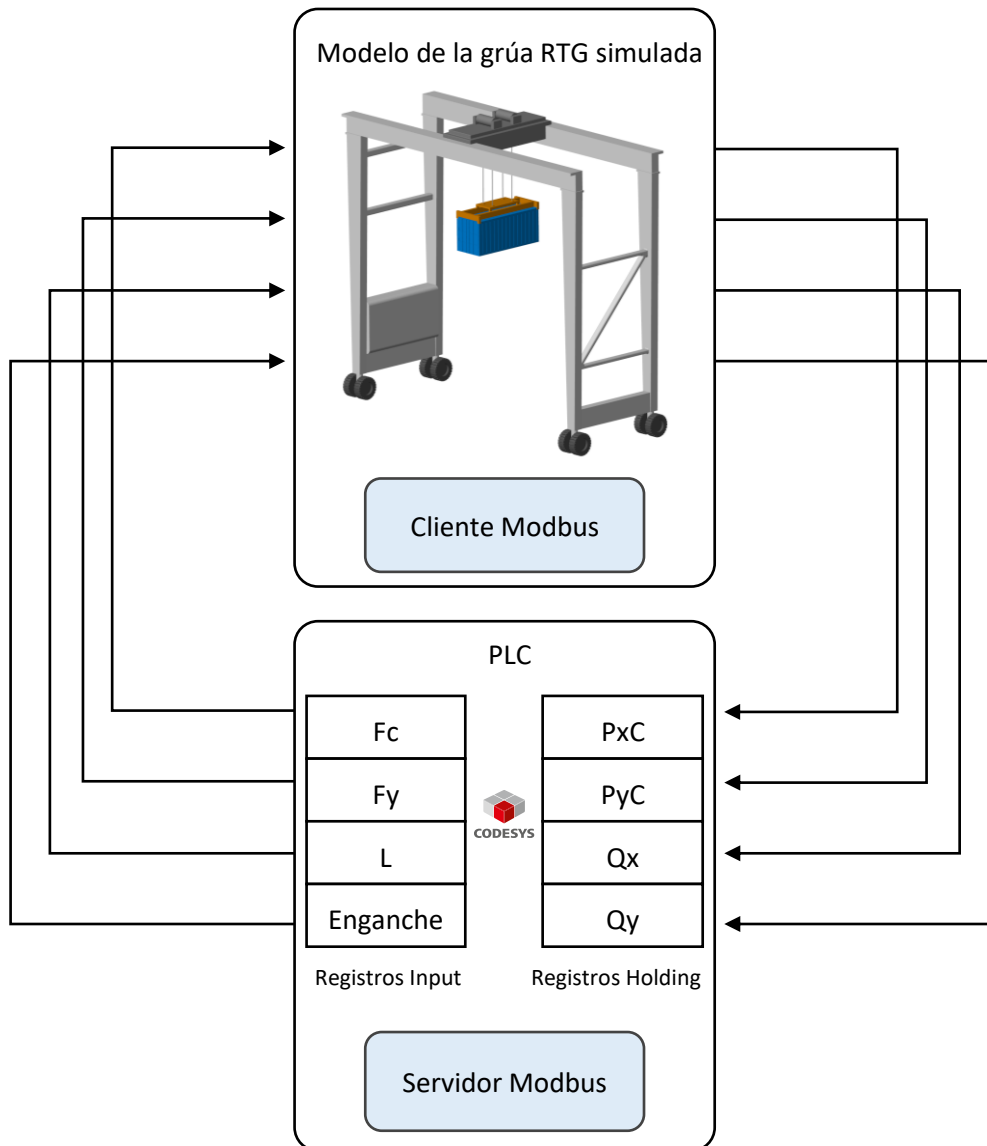
## 6.3 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN Y GENERALIDADES

A la hora de seleccionar un protocolo de comunicaciones industriales para transferir datos entre sistemas se dispone de muchas opciones, algunas de las cuales son: Profibus, Ethernet/IP, Profinet, Modbus, etc. En el caso de la comunicación establecida entre el PLC programado en el capítulo anterior y la grúa RTG simulada se escoge Modbus como protocolo a emplear. Esta decisión se basa en diferentes factores que hacen que este protocolo sea una mejor opción que los anteriores, sin embargo, cualquier protocolo sería válido, no siendo Modbus la única opción factible. La gran ventaja del protocolo Modbus frente al resto es su simplicidad, puesto que solo tiene implementado el nivel físico y el de enlace del modelo OSI, dejando libre la capa de aplicaciones (Guijarro Estellés & Ye Lin, 2023). Puesto que el PLC empleado no es un autómata físico, sino que se implementa dentro de una red de internet, se emplea en este caso una versión extendida del protocolo Modbus, Modbus/TCP, el cual permite su utilización sobre la capa de transporte TCP/IP (comunicación internet).

## 6.4 COMUNICACIÓN ENTRE MODELO DE LA GRÚA Y PLC

Se comentará ahora la parte de entradas y salidas del sistema PLC-Sistema simulado, teniendo en cuenta que, en este caso, el modelo simulado actúa como cliente Modbus, mientras que el PLC es el servidor. La Figura 70 muestra el esquema de funcionamiento de la comunicación entre estos sistemas.

**Figura 70 Esquema de la comunicación Modbus (elaboración propia)**



Como puede observarse, las salidas del modelo simulado son las entradas del PLC y viceversa. Para el tratamiento desde el PLC de estas entradas y salidas, se disponen de registros Holding (entradas al PLC) y registros Input (salidas del PLC). En la Figura 71 se muestra el aspecto de estos registros junto con sus direcciones en Codesys.

**Figura 71 Registros en Codesys y sus direcciones**

Variable	Asignación	Canal	Dirección	Tipo	Unidad	Descripción
		Registros Holding	%IW0	ARRAY [0..5] OF WORD		
		Registros Holding[0]	%IW0	WORD		
		Registros Holding[1]	%IW1	WORD		
		Registros Holding[2]	%IW2	WORD		
		Registros Holding[3]	%IW3	WORD		
		Registros Holding[4]	%IW4	WORD		
		Registros Holding[5]	%IW5	WORD		
		Registros Input	%QW0	ARRAY [0..3] OF WORD		
		Registros Input[0]	%QW0	WORD		
		Registros Input[1]	%QW1	WORD		
		Registros Input[2]	%QW2	WORD		
		Registros Input[3]	%QW3	WORD		



En este punto, es necesario determinar el periodo de muestreo con el que se establece esta comunicación. Para ello, se emplean las señales de oscilaciones como señales de referencia, puesto que estas son las que mayor variación presentan con el tiempo. Además, según el teorema de Nyquist-Shannon, para poder reconstruir sin pérdida una señal cuyo ancho de banda en frecuencia esta acotado por una frecuencia  $\omega_c$ , la frecuencia de muestreo de dicha señal debe ser mayor al doble de  $\omega_c$ . Debe tenerse en cuenta que este teorema establece un límite que no suele ser el empleado en control, puesto que para discretizar y muestrear una señal se toma como estándar frecuencias unas diez o veinte veces mayores que la frecuencia de corte de la señal.

En este caso, obtener la frecuencia de las señales más rápidas, las oscilaciones del péndulo, es fácil, puesto que la ecuación del periodo de un péndulo es conocida y tiene la forma siguiente:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Siendo T el periodo del péndulo, L la longitud de este, y g la constante de aceleración gravitacional. Dado que se quiere obtener la medida en el caso más desfavorable, se tomará la menor longitud de péndulo, la cual se ha considerado un metro, como mínima distancia entre el carro y el spreader. Con esta consideración, el mínimo periodo que tiene la oscilación del spreader es de 2 segundos. Este periodo, equivale a una frecuencia de  $\pi$  radianes por segundo, puesto que la relación entre periodo y frecuencia es:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Aplicando el rango superior del estándar empleado mayoritariamente en control, se multiplica esta frecuencia por veinte para obtener la frecuencia de muestreo, la cual es de  $20\pi$  radianes por segundo, frecuencia que equivale a un periodo de muestreo de 0,1 segundos.

Dado que este periodo de muestreo es suficientemente elevado como para permitir la realización de las tareas del PLC de forma holgada se escoge directamente este periodo de muestreo, no obstante, si el periodo obtenido hubiese sido tan pequeño que dificulta la realización a tiempo de las tareas implementadas en el PLC habría sido necesario relajar las exigencias y multiplicar el periodo del péndulo por un número más pequeño como 15 o 10.

## 6.5 EXTRAPOLACIÓN A UNA COMUNICACIÓN CON EL SISTEMA REAL

De manera breve, se comentan en este apartado las diferencias existentes entre la comunicación empleada en este caso para el control de un modelo simulado mediante un PLC virtual y una forma de conexión entre una serie de PLCs reales y la grúa RTG real.

La primera diferencia es el medio de conexión, mientras que para este caso la conexión ha sido inalámbrica por ethernet, en el caso real se emplearán medios guiados y conexiones cableadas. Otra diferencia fundamental es que, como se recogía en el capítulo 3, las grúas RTG tienen más de un PLC y se conectan formando una red con esquema estrella. Se debe mencionar también que, en las grúas RTG reales, dependiendo de los sistemas que contengan y de otra serie de factores, pueden utilizar distintos protocolos de comunicación diferentes a Modbus. Para terminar, cabe destacar que para implementar este sistema de comunicación y control en la grúa RTG real se requerirá de sensores y encoders que permitan medir y transmitir la información relativa a las posiciones y ángulos.



# CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

## 7.1 INTRODUCCIÓN

Tras la realización de todas las tareas necesarias para conseguir los objetivos propuestos para este trabajo, se plantean ahora una serie de conclusiones derivadas del desarrollo de cada una de ellas. Además, tras una evaluación del trabajo realizado, se proponen mejoras y ampliaciones que podrían ser de interés para seguir investigando sobre el modelado y control de una máquina como la grúa RTG o similares.

## 7.2 ESTRUCTURA

La estructura de este capítulo es sencilla y consta de tres únicos subapartados, uno dedicado a la revisión de los objetivos, comprobando el cumplimiento de cada uno de ellos, otro apartado reservado para mostrar aquellos puntos en que puede ampliarse y mejorarse este trabajo, y, por último, un apartado de conclusiones generales.

## 7.3 CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

Se presentan los objetivos propuestos para este trabajo, así como una breve discusión sobre el cumplimiento de cada uno de ellos.

- **Entendimiento y comprensión completa de las tendencias actuales en la automatización de las grúas RTG en la operación de patio de las terminales portuarias de contenedores**

Este objetivo se cumple de manera completa en los primeros capítulos. En el segundo capítulo se estudia desde lo general a lo particular las terminales portuarias de contenedores, su relación con el patio de contenedores y las máquinas empleadas, y la naturaleza de dichas máquinas. Además, se presentan también los motivos que promueven la creciente automatización de las terminales junto con la descripción de las principales tendencias. Además, en la primera parte del tercer capítulo se muestra de manera completa el funcionamiento de una grúa RTG presentando alguno de los sistemas de automatización más empleados, como son el auto-steering y los sistemas anti-colisión.

- **Desarrollo de un modelo simulado completo y realista de una grúa RTG que permita todos sus movimientos y operaciones**

El cumplimiento de este objetivo se encuentra presente en el capítulo 3. En este capítulo se desarrolla el modelo simulado de una grúa RTG tipo partiendo del entendimiento de los elementos de la misma. Una vez se entienden los elementos que la componen, se comprende el modelo físico-matemático en el que se fundamenta su funcionamiento. Y, por último, se genera el modelo simulado de la grúa mediante la creación de diferentes modelos CAD y su inclusión e interconexión dentro del software Simscape Multibody. Además, se realizan ensayos sobre este modelo para comprobar la validez de este.

- **Diseño de un sistema de control de los movimientos en los 3 ejes del contenedor operado por la grúa RTG simulada**

Este es uno de los objetivos más interesantes, ya que no solo se consigue un control de los movimientos del contenedor, sino que se estudian y prueban diferentes técnicas de control, empezando por el método de planificación de ganancias sobre un único controlador PID que controla la posición en dos ejes del contenedor. Tras observar que este sistema, aun consiguiendo un buen establecimiento de la posición, hace que se presenten grandes oscilaciones de la carga suspendida, se plantea un esquema con medidas extras de estas oscilaciones para conseguir limitarlas, consiguiendo mediante un doble lazo de control un sistema anti balanceo, que también se beneficia del algoritmo de planificación de ganancias.

- **Planteamiento de una propuesta de implementación del algoritmo de control diseñado dentro del esquema de autómatas programables de las grúas RTG reales.**

El capítulo 5 consigue completar este objetivo al trasladar el control con doble lazo y planificación de ganancias desarrollado en Simulink a un autómata programable conectado con el modelo simulado de la grúa mediante Modbus. La propuesta planteada es modular con un programa destinado a cada tarea.

- **Desarrollo de la comunicación industrial necesaria entre el sistema simulado y el autómata programable mediante el protocolo de comunicaciones industriales Modbus, simulando la comunicación real entre el esquema de autómatas y la grúa reales.**

Este objetivo se consigue en los apartados 5 y 6. En el capítulo 5 solo se comenta de manera superficial la forma de transferir la información, quedando así el capítulo 6 reservado a la explicación completa de la conexión Modbus empleada. Además, tal como se establecía en el objetivo, esta comunicación se establece teniendo en mente su extrapolación a la conexión del sistema real.

- **Validación de la propuesta de control, así como de la simulación planteada mediante diferentes tipos de ensayos y una secuencia de recogida y depósito de un contenedor entre dos puntos del patio.**

En el capítulo 4, se desarrolla un ensayo mediante el cual se simula una secuencia de recogida, depósito y vuelta al punto inicial sobre el modelo de la grúa simulada. Este ensayo se codifica en un código de Matlab que permite modificar el punto de recogida y depósito, así como la altura de elevación y la masa del contenedor. De esa forma se puede comprobar que para cualquier combinación de parámetros la operación se realiza de forma correcta. Este ensayo se simula para todos los tipos de control evaluando su desempeño relativo. Además, también se emplea a la hora de validar la implementación del algoritmo de control en el PLC.

## 7.4 AMPLIACIONES Y MEJORAS

Este trabajo, a pesar de haber cumplido de forma amplia los objetivos propuestos, tiene un alcance limitado debido a límites de tiempo, capacidades de procesamiento de datos, profundidad de conocimientos, etc. Es por este motivo por el cual se presentan a continuación algunas propuestas,

mediante las cuales se pueden establecer futuras líneas de investigación o ampliaciones al trabajo desarrollado.

La primera propuesta tiene que ver con el modelo desarrollado de la grúa simulada. Debido a la escasez de información pública disponible sobre las características y detalles de las grúas pórtico tipo RTG, por ser estas unas máquinas muy específicas empleadas solo dentro del contexto de las terminales portuarias de contenedores, y por ser parte del *Know-how* de los fabricantes, este modelo no cuenta con un alto nivel de detalle, lo cual no implica que no sea válido o realista, sin embargo, con la información adecuada, podría modificarse para acercarse más a la realidad de estas máquinas.

Siguiendo con el modelo simulado, otra mejora posible sería añadir un modelo más realista de fricción, como por ejemplo el modelo de curva de *strickbeck*, o el modelo *stick-slip*.

En cuanto al sistema de control diseñado con planificación de ganancias, para la selección de las ganancias de los controladores podría plantearse algún método alternativo, como por ejemplo métodos basados en algoritmos genéticos de forma que tras una serie de iteraciones sobre el modelo simulado se obtenga para cada punto de operación una combinación de ganancias que minimicen unos ciertos índices, como pueden ser las integrales de los errores absolutos de la posición y el ángulo. Aunque esto se planteó para este trabajo, la cantidad de variables a combinar junto con el hecho de que para cada iteración se debe simular un ensayo sobre la grúa hace este proceso inviable con la potencia de cálculo disponible en un ordenador convencional.

Como segunda propuesta de mejora sobre el sistema de control, en caso de haber planteado un mejor modelo de fricción para el modelo de la grúa simulada se podría estudiar la inclusión de algún algoritmo de compensación de la fricción para controlar el nuevo modelo.

## 7.5 CONCLUSIONES

Las conclusiones fundamentales de este trabajo son las siguientes: Se ha conseguido investigar sobre la automatización de un tipo de maquinaria industrial empleada en las terminales portuarias de contenedores, las grúas RTG. Se ha diseñado un modelo simulado de esta maquinaria, a modo de gemelo digital. Se ha propuesto y diseñado un sistema de control, que no solo controla la posición del contenedor que porta la grúa, sino que además reduce la oscilación de este en su movimiento. Y, se ha implementado este control dentro de un autómatas programable conectado mediante un protocolo Modbus al modelo simulado, demostrando que es una solución válida para el control de estas máquinas.

Este breve resumen plasma de forma global las tareas realizadas a lo largo de este trabajo, siempre con el objetivo de proponer una solución a la automatización de estas grúas, basada en técnicas de retrofitting. Estas grúas son mayoría en la gran cantidad de terminales portuarias de contenedores de todo el mundo, por este motivo es tan relevante trabajar en esta dirección.

Más allá del trabajo realizado, la implementación de esta solución en una grúa RTG real tendría consecuencias muy positivas, como por ejemplo el aumento de la seguridad, la eficiencia, el ahorro energético y el aumento de la vida útil de la grúa.

Tras mencionar algunas, se relacionan ahora las ventajas que se obtendrían de la aplicación de este sistema de control planteado para una grúa RTG mediante técnicas de *retrofitting* con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas (AG-ONU, s.f.).

- Mejora de la vida útil de la grúa RTG:

La aplicación de esta automatización se enmarca dentro de las técnicas de retrofitting. Estas técnicas permiten la actualización y modernización de equipos existentes, extendiendo su vida útil y evitando la necesidad de adquirir equipos nuevos.

Este enfoque contribuye significativamente al ODS 12: Producción y consumo responsables, al reducir el consumo de recursos y la generación de residuos.

- Eficiencia energética y reducción de emisiones:

El control diseñado para la grúa RTG permite una operación más eficiente, reduciendo errores humanos, recorridos innecesarios, maniobras lentas, etc. minimizando así el consumo energético y, en consecuencia, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

Este aspecto se alinea con el ODS 13: Acción por el clima, ya que promueve la adopción de prácticas industriales sostenibles que contribuyen a mitigar el cambio climático.

- Innovación y actualización tecnológica:

La implementación de tecnologías avanzadas de control en la grúa RTG fomenta la innovación y la adopción de nuevas tecnologías en el sector de la logística y el transporte.

Esto está fuertemente relacionado con el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, que destaca la importancia de desarrollar infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación.

# REFERENCIAS

- A. Bisoffi, R. B. (2020). To stick or to slip: A reset PID control perspective on positioning systems with friction. *Annual Reviews in Control*, 37-63.
- AG-ONU. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Objetivos de Desarrollo Sostenible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- CargoFlores. (s.f.). *CONTAINERS: TIPOS, MEDIDAS Y USOS*. Recuperado el 10 de Febrero de 2024, de <https://www.cargoflores.com/containers/>
- CODESYS Group. (1 de Julio de 2024). *CODESYS*. Obtenido de CODESYS: <https://www.codesys.com/>
- conelectronica. (Mayo de 2020). *Conectronica*. Recuperado el 14 de Febrero de 2024, de <https://www.conelectronica.com/cableado-estructurado/cadena-portacables-autoglide-5-igus-sin-guiado-carriles>
- Cornelissen, D. (s.f.). *portpictures.nl*. Recuperado el 20 de Febrero de 2024, de <https://www.portpictures.nl/>
- Cozanet, H. (s.f.). *Marine Marchande*. Recuperado el 20 de Febrero de 2024, de <https://www.marine-marchande.net/>
- D.J, L., & WE., L. (2000). *Survey of Gain-Scheduling Analysis & Design*. Obtenido de [https://mural.maynoothuniversity.ie/1834/1/1001965764\\_link\\_19992.pdf](https://mural.maynoothuniversity.ie/1834/1/1001965764_link_19992.pdf)
- Fundación Valenciaport. (Diciembre de 2011). *MASPORT – METODOLOGÍAS DE AUTOMATIZACIÓN Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN Y MEJORA DE LA CAPACIDAD, RENDIMIENTO Y NIVEL DE SERVICIO DE TERMINALES PORTUARIOS DE CONTENEDORES*. Obtenido de MASPORT – METODOLOGÍAS DE AUTOMATIZACIÓN Y SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN Y MEJORA DE LA CAPACIDAD, RENDIMIENTO Y NIVEL DE SERVICIO DE TERMINALES PORTUARIOS DE CONTENEDORES: <https://www.fundacion.valenciaport.com/proyecto/844/>
- Fundación ValenciaPort. (2012). La TPC como sistema, subsistemas y su relación. En F. ValenciaPort, *La Terminal Portuaria De Contenedores* (págs. 55-68). Valencia: Comunicación Gráfica.
- Guijarro Estellés, E., & Ye Lin, Y. (11 de Septiembre de 2023). Tema 5, Instrumentación en el entorno industrial. *Instrumentación en el entorno industrial*.
- H. Olsson, K. Å. (1998). Friction Models and Friction Compensation. *European Journal of Control*, 176-195.
- Jing Na, Q. C. (2018). Adaptive Control for Manipulation Systems With Discontinuous Piecewise Parametric Friction Model. En Q. C. Jing Na, *Adaptive Identification and Control of Uncertain Systems with Non-smooth Dynamics* (págs. 93-105).
- Konecranes. (Junio de 2021). *FEATURES AND TECHNICAL INFORMATION, Konecranes RTG: from the creator of the modern RTG*. Recuperado el 15 de Febrero de 2024, de [https://www.konecranes.com/sites/default/files/2021-06/RTG\\_typical\\_tech\\_specs\\_0.pdf](https://www.konecranes.com/sites/default/files/2021-06/RTG_typical_tech_specs_0.pdf)
- Konecranes. (Enero de 2022). *CARACTERÍSTICAS E INFORMACIÓN TÉCNICA Grúa RTG de Konecranes: del creador de la RTG moderna*. Recuperado el 14 de Abril de 2024, de

- [https://www.konecranes.com/sites/default/files/2022-01/Konecranes\\_RTG\\_tech\\_document\\_%28ES%29\\_0.pdf](https://www.konecranes.com/sites/default/files/2022-01/Konecranes_RTG_tech_document_%28ES%29_0.pdf)
- Konecranes. (s.f.). *Konecranes*. Recuperado el 13 de Abril de 2024, de <https://www.konecranes.com/es-es>
- Liebherr. (s.f.). *Technical Description Rubber Tyre Gantry Crane*. Recuperado el 12 de Mayo de 2024, de <https://www.liebherr.com/shared/media/maritime-cranes/downloads-and-brochures/brochures/lcc/liebherr-rtg-cranes-technical-description.pdf>
- MathWorks. (2024). *Gain Scheduling Basics*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/help/control/ug/gain-scheduled-control-systems.html>
- Morin, D. (2007). *The Lagrangian Method*. Recuperado el 26 de Junio de 2024, de <https://scholar.harvard.edu/files/david-morin/files/cmchap6.pdf>
- Omidi, E. (s.f.). *Modeling and Nonlinear Control of Gantry Crane Using Feedback Linearization Method*. Recuperado el 11 de 3 de 2024, de <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1405/1405.5926.pdf>
- Rajapakshe, M. P. (2011). Physically Meaningful Harmonization of Tire/Pavement Friction Measurement Devices. *University of South Florida/Graduate School Theses and Dissertations*, 180. Obtenido de researchgate.
- Simarro Fernández, R. (s.f.). Algoritmo “forma paralela” con anti-windup. *Implementación de PID*s.
- Solihin, M. I. (2008). Objective function selection of GA-based PID control optimization for automatic gantry crane. *Computer and Communication Engineering, 2008. ICCCE 2008. International Conference on*, (págs. 883 - 887).
- Universidad de Sevilla. (10 de Noviembre de 2009). *Modelado de la fricción*. Obtenido de Modelado de la fricción: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4022/fichero/Memoria%252F05+-+Modelado+de+la+fricci%C3%B3n.pdf>
- UPV. (31 de Julio de 2023). *Cátedra Valenciaport*. Obtenido de Cátedra Valenciaport: <https://www.upv.es/noticias-upv/noticia-14242-catedra-valenc-es.html>
- UPV/EHU. (s.f.). *Las ecuaciones de Lagrange*. Recuperado el 26 de Junio de 2024, de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/dinamica/lagrange/lagrange.html>
- Villodres Martín, A. (7 de Mayo de 2017). *Descripción y estudio técnico de la grúa de patio RTG. Sistema eléctrico y mantenimiento*. Recuperado el 10 de Febrero de 2024, de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/106321>





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

# Desarrollo del modelado y el sistema de control de una grúa RTG utilizada en la operativa de las terminales portuarias de contenedores

---

# PRESUPUESTO

---

Trabajo Final de Máster

DAVID RODRÍGUEZ BASCUÑANA

Julio, 2024

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	1
UNIDAD DE OBRA 1. ESTUDIOS DEL PROBLEMA Y SU ESTADO ACTUAL .....	1
UNIDAD DE OBRA 2. DESARROLLO DEL MODELO SIMULADO DE LA GRÚA.....	1
UNIDAD DE OBRA 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	2
UNIDAD DE OBRA 4. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL EN EL PLC .....	2
UNIDAD DE OBRA 5. REDACCIÓN DE LA MEMORIA .....	2
DIVISIÓN POR TIPO DE RECURSO .....	3
PRESUPUESTO .....	3

# INTRODUCCIÓN

El presupuesto es una parte fundamental de cualquier proyecto, puesto que en él se refleja el coste económico asociado a la realización del mismo. El presupuesto de este trabajo se compone de cinco unidades de obra.

Es necesario comentar que existe un único presupuesto, que es el referente a la realización del trabajo en su conjunto formado por una serie de unidades de obra. Por tanto, el cálculo del importe de cada unidad se puede obviar puesto que la medición de cada unidad de obra es unitaria y el coste unitario es el relativo al coste mostrado al final de cada tabla correspondiente a las distintas unidades de obra.

En cada unidad de obra existe una división entre recursos materiales y humanos. En los recursos humanos, se propone la realización de las tareas por dos ingenieros industriales superiores (ing1 y ing2). Para el cálculo de los precios unitarios de los recursos materiales inventariables se emplea la fórmula:

$$\left( \frac{\text{Tiempo de uso del equipo}}{\text{Periodo de amortización}} \right) \cdot \text{Coste del equipo}$$

UNIDAD DE OBRA 1. ESTUDIOS DEL PROBLEMA Y SU ESTADO ACTUAL				
RECURSOS	Concepto	Precio unitario	Cantidad	Coste
MATERIALES	Ordenador personal	15,00 €/mes	2 meses	30,00 €
HUMANOS	Estudio del problema en detalle (Ing 1)	27,00 €/h	20 h	540,00 €
	Estudios preliminares generales (Ing 2)	27,00 €/h	10 h	405,00 €
COSTE UNIDAD DE OBRA 1				<b>975,00 €</b>

UNIDAD DE OBRA 2. DESARROLLO DEL MODELO SIMULADO DE LA GRÚA				
RECURSOS	Concepto	Precio unitario	Cantidad	Coste
MATERIALES	Ordenador personal	15,00 €/mes	2 meses	30,00 €
	Software Matlab	67,00 €/mes	2 meses	134,00 €
	Software Simulink	100,00 €/mes	2 meses	200,00 €
	Software Simscape multibody	67,00 €/mes	2 meses	134,00 €
HUMANOS	Estudios previos (Ing 1)	27,00 €/h	15 h	405,00 €
	Modelado en Simulink (Ing 1)	27,00 €/h	40 h	1.080,00 €
	Desarrollo de código en Matlab (Ing 2)	27,00 €/h	10 h	270,00 €
	Generación de los modelos 3D (Ing 2)	27,00 €/h	20 h	540,00 €
COSTE UNIDAD DE OBRA 2				<b>2.793,00 €</b>

UNIDAD DE OBRA 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL				
RECURSOS	Concepto	Precio unitario	Cantidad	Coste
MATERIALES	Ordenador personal	15,00 €/mes	3 meses	45,00 €
	Software Matlab	67,00 €/mes	3 meses	201,00 €
	Software Simulink	100,00 €/mes	3 meses	300,00 €
	Software Simscape multibody	67,00 €/mes	3 meses	201,00 €
HUMANOS	Estudios previos (Ing 2)	27,00 €/h	10 h	270,00 €
	Diseño de los sistemas de control (Ing 1)	27,00 €/h	50 h	1.350,00 €
	Desarrollo de ensayos (Ing 1)	27,00 €/h	20 h	540,00 €
	Validación de los controles (Ing 2)	27,00 €/h	10 h	270,00 €
COSTE UNIDAD DE OBRA 3				<b>3.177,00 €</b>

UNIDAD DE OBRA 4. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL EN EL PLC				
RECURSOS	Concepto	Precio unitario	Cantidad	Coste
MATERIALES	Ordenador personal	15,00 €/mes	2 meses	30,00 €
	Software Matlab	67,00 €/mes	2 meses	134,00 €
	Software Simulink	100,00 €/mes	2 meses	200,00 €
	Software Simscape multibody	67,00 €/mes	2 meses	134,00 €
	Software Codesys	45,83 €/mes	2 meses	91,66 €
HUMANOS	Estudios previos (Ing 2)	27,00 €/h	10 h	270,00 €
	Programación del PLC (Ing 1)	27,00 €/h	40 h	1.080,00 €
	Comunicación entre dispositivos (Ing 1)	27,00 €/h	10 h	270,00 €
	Validación de la implementación (Ing 2)	27,00 €/h	10 h	270,00 €
COSTE UNIDAD DE OBRA 4				<b>2.479,66 €</b>

UNIDAD DE OBRA 5. REDACCIÓN DE LA MEMORIA				
RECURSOS	Concepto	Precio unitario	Cantidad	Coste
MATERIALES	Ordenador personal	15,00 €/mes	2 meses	30,00 €
HUMANOS	Redacción de la memoria (Ing 1)	27,00 €/h	20 h	540,00 €
COSTE UNIDAD DE OBRA 5				<b>570,00 €</b>

## DIVISIÓN POR TIPO DE RECURSO

Los costes mostrados de todas las unidades de obra pueden dividirse en costes materiales y costes humanos. La división de los costes totales según esto queda de la siguiente forma:

Tipo de recurso	Coste
MATERIAL	1.894,66 €
HUMANO	8.100,00 €
<b>Total</b>	<b>9.994,66 €</b>

## PRESUPUESTO

A continuación, se muestra el presupuesto total dividido en unidades de obra y con los correspondientes gravámenes.

PRESUPUESTO	
Concepto	Coste
UNIDAD DE OBRA 01	975,00 €
UNIDAD DE OBRA 02	2.793,00 €
UNIDAD DE OBRA 03	3.177,00 €
UNIDAD DE OBRA 04	2.479,66 €
UNIDAD DE OBRA 05	570,00 €
<b>Presupuesto de ejecución material</b>	<b>9.994,66 €</b>
Gastos generales (12%)	1.199,36 €
Beneficio industrial (6%)	599,68 €
<b>Presupuesto de ejecución por contrata</b>	<b>11.793,70 €</b>
IVA (21%)	2.476,68 €
<b>Presupuesto base licitación</b>	<b>14.270,38 €</b>

El presupuesto asciende a un total de **CATORCE MIL DOSCIENTOS SETENTA EUROS CON TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS.**





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

# **Desarrollo del modelado y el sistema de control de una grúa RTG utilizada en la operativa de las terminales portuarias de contenedores**

---

## **ANEXOS**

---

Trabajo Final de Máster

DAVID RODRÍGUEZ BASCUÑANA

Julio, 2024

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. MODELO DE LA GRÚA SIMULADA, CONTROLES Y COMUNICACIÓN CON EL AUTOMATA PROGRAMABLE .....	1
1.1 Manual de usuario.....	1
1.2 Manual de programador .....	2



# 1. MODELO DE LA GRÚA SIMULADA, CONTROLES Y COMUNICACIÓN CON EL AUTOMATA PROGRAMABLE

En esta primera parte del anexo se muestra un manual de usuario y otro de programador para el modelo de la grúa RTG simulada configurado en Simulink mediante Simscape multibody, su control, y su comunicación con el PLC virtual en Codesys. Todos los archivos Simulink, modelos 3D y códigos en Matlab necesarios se encuentran en un repositorio online público, disponible desde el enlace: <https://github.com/Darodbas/Modelo-Simulado-RTG>.

## 1.1 Manual de usuario

Se describe en este pequeño manual la forma para poner en funcionamiento desde cero el modelo de la grúa RTG simulada creado, simular los controles propuestos en el documento memoria, y conectar este modelo con el PLC virtual.

Primero, se deben descargar todos los ficheros disponibles en el repositorio mencionado en una única carpeta. Una vez hecho esto, debe abrirse la aplicación Matlab, la cual debe tener instalados los siguientes añadidos: *Simscape Multibody* Y *Industrial Communication Toolbox*. Se podrá emplear cualquier versión de Matlab posterior a la 2022b. Para abrir el modelo simulado de la grúa simplemente se debe abrir el archivo *Simulacion\_BASE.slx*. Este archivo contiene el sistema completo de la grúa RTG sin ningún tipo de control, solo el bloque mostrado en la Figura 30 del documento memoria. Para la simulación de todos los modelos se cuenta con el código en Matlab *Codigo\_ensayos.mlx*. Existen dos métodos para simular todos los modelos Simulink disponibles en el repositorio. El primero consiste en ejecutar la primera sección de *Codigo\_ensayos.mlx* o cargar los datos disponibles en *Datos\_iniciales.mat*, lo cual genera las constantes, vectores y variables necesarias para el correcto funcionamiento de los modelos, y, posteriormente, simular el modelo directamente desde Simulink mediante el botón *Run*. La segunda forma es ejecutar *Codigo\_ensayos.mlx* completo, indicando en la línea 90 el nombre del modelo Simulink que pretende simularse. Si además se quieren graficar las respuestas del modelo deben disponerse bloques tipo *Outport* en aquellas variables que se quieran medir. En los modelos Simulink que implementan los sistemas de control estos bloques *Outport* ya se encuentran disponibles, sin embargo, en el modelo base no existen.

Para hacer funcionar alguno de los sistemas de control diseñados debe abrirse el modelo Simulink correspondiente, siendo *Simulacion\_RTG\_Planificacion\_Ganancias.slx* el que contiene el control básico con un regulador PID por cada movimiento controlado, y, *Simulacion\_RTG\_Planificacion\_Ganancias\_Anti\_swing.slx* el que presenta el control anti-balanceo. La simulación de estos modelos sigue el mismo procedimiento comentado anteriormente.

Por último, se comenta como realizar el control de la grúa mediante un PLC virtual conectado por Modbus/TCP al modelo simulado de la grúa.

El primer paso es tener instalado el software Codesys. El proyecto se ha realizado con la versión V3.5 SP19 patch 7. Una vez instalado Codesys se debe abrir el proyecto disponible en el repositorio con el nombre *Proyecto\_PLC\_Grua.project*. Con el proyecto abierto en Codesys debe revisarse la configuración de la red. Para ello, en la pestaña de dispositivos a la izquierda se selecciona el elemento *Device*, y, dentro de él, en el apartado Configuración de comunicaciones crear un *Gateway*. Para ello primero se pone en marcha el PLC desde la barra de tareas de Windows, después, en Codesys se clica

la opción de examinar red y se selecciona el PLC que acabamos de iniciar. Una vez seleccionado se habrá configurado correctamente la comunicación entre Codesys y el PLC virtual.

Tras esto, debe abrirse en Matlab el modelo *Simulacion\_Comunicacion\_PLC.slx*, el cual está preparado para recibir y enviar los datos del modelo de la grúa al PLC mediante Modbus/TCP, y los códigos Matlab *Comunicacion\_PLC\_grua.m*, *EscribirDatos.m* y *LeerDatos.m*. En el código *Comunicacion\_PLC\_grua.m* debe cambiarse la dirección IP por aquella en la que se esté ejecutando el PLC. Con todos estos pasos previos realizados, la secuencia para establecer la comunicación y ejecutar la simulación del control del modelo es la siguiente.

1. Desde la barra de tareas iniciar el PLC virtual
2. Desde Codesys iniciar la sesión (Alt+F8) (Compilando primero el código si es necesario)
3. Iniciar el programa en Codesys con el botón de inicio (F5)
4. En Matlab iniciar el programa *Comunicacion\_PLC\_grua.m*

El archivo *Comunicacion\_PLC\_grua.m* se encarga de establecer la comunicación entre Matlab y el PLC, y, además también inicia la simulación del modelo de la grúa.

## 1.2 Manual de programador

En este apartado se comenta de forma sencilla los datos técnicos más relevantes de los modelos y códigos generados para la simulación, control y comunicaciones.

En cuanto a los modelos Simulink, lo más destacable es que estos hacen uso de los bloques y reglas establecidos por Simscape multibody, teniendo todos los bloques que representan un sólido dos puertos, B y F, *Base* y *Follower*, mediante los cuales pueden establecerse las relaciones geométricas entre ellos. Una particularidad de los modelos en Simulink es que, los modelos CAD, los cuales se importan a Simulink mediante el bloque *File solid*, no tienen directamente la orientación correcta para multibody, puesto que se han exportado de Autodesk Inventor. Es por este motivo por el cual en distintos puntos del modelo y de sus subsistemas se disponen de bloques *rigid transform* con un único giro. Los bloques *rigid transform* también se emplean a la hora de implementar articulaciones, ya que, algunas de ellas solo se disponen para el movimiento en un eje en concreto. Por ejemplo, la articulación *Prismatic Joint* solo permite el movimiento relativo de dos sólidos en el eje z, por tanto, se deben de realizar transformaciones geométricas que consigan cambiar el eje de movimiento por el eje z, para aplicar la articulación, y, posteriormente deshacer el cambio de eje.

La edición de los parámetros de los modelos es sencilla, puesto que la mayoría de ellos están directamente codificados en los bloques. No obstante, para modificar datos relativos a las posiciones iniciales, o a los movimientos que se realizan en los ensayos se deben modificar los parámetros del archivo *Datos\_iniciales.mat*, o los datos que se calculan en *Codigo\_ensayos.mlx*.

En relación con la comunicación entre el PLC y el modelo simulado, en el documento memoria ya se ha descrito la forma y estructura de los datos, y, como se comunican con el PLC a través de registros *Input* y registros *Holding*. Para la generación de los códigos de las tareas que realiza el PLC se emplean dentro de la *MainTask* cuatro POUs (Program Organization Unit) en texto estructurado. Estos POUs se configuran para ejecutarse con la misma prioridad y una periodicidad de 100 ms.

Por último, para la lectura y escritura de los datos por parte de Matlab, se crean los códigos antes comentados *EscribirDatos.m* y *LeerDatos.m*. Estos son unos códigos sencillos encargados de aplicar las transformaciones necesarias para el tratamiento de los datos, y, permitir su transmisión por Modbus.